

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А.І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: Автоматизація процесу прожарювання вуглецевих виробів

Виконала студентка 4 курсу, групи ЛА-52

\_\_\_\_\_ Барчан Вікторія Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ зав. каф., д. т. н., професор Жученко А.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант Охорона праці \_\_\_\_\_ к. т. н., доцент Ковтун І.М.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

## Додаток Д.2. ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4				Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ДП ЛА52.02. 00.000 ПЗ			Пояснювальна записка	118	
3	A4	ДП ЛА52.02. 00.000			Д.1. Специфікація устаткування, виробів, матеріалів	5	
4	A4	ДП ЛА52.02. 00.000			Д.2. Відомість дипломного проекту	1	
5	A1	ДП ЛА5202. 00.000 СхА			Схема автоматизації функціональна	1	

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Інженерно-хімічний факультет  
(повна назва)

Кафедра Автоматизації хімічних виробництв  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050202 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А.І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

Барчан Вікторії Віталіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація процесу прожарювання вуглецевих виробів,  
керівник проекту Жученко Анатолій Іванович, зав. каф., д. т. н., професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «12» травня 2019 р. № 1525

2. Термін подання студентом проекту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту система керування, що забезпечує задані часові показники якості процесу керування

4. Зміст пояснювальної записки

Аналіз процесу прожарювання вуглецевих виробів; розробка схеми автоматизації процесу; математичне моделювання електрокальцинатора; синтез та дослідження системи керування електрокальцинатора; охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема автоматизації процесу прожарювання вуглецевих виробів.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун І.М., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз процесу прожарювання вуглецевої сировини	1.04.2019	
2	Розробка схеми автоматизації	08.04.2019	
3	Отримання математичної моделі об'єкта керування	20.04.2019	
4	Дослідження властивостей об'єкта керування на основі математичної моделі	23.04.2019	
5	Ідентифікація об'єкта керування	30.04.2019	
6	Синтез системи керування	06.05.2019	
7	Розробка креслень	25.05.2019	
8	Охорона праці	03.06.2019	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Барчан В.В.  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_ (підпис)

Жученко А. І.  
(ініціали, прізвище)

## Реферат

Дипломний проект бакалавра, виконаний на тему «Автоматизація процесу прожарювання вуглецевих виробів», містить 118 сторінок пояснювальної записки, 33 ілюстрацій, 4 таблиці, 1 додаток, 1 креслення та 43 бібліографічних найменувань.

Метою проекту є створення системи керування технологічним процесом.

Проведено дослідження процесу прожарювання вуглецевих виробів, створено високоточну ANSYS модель процесу, проведено ідентифікацію моделі процесу, дослідження властивостей об'єкта керування на основі математичної моделі, виконано налаштування ПД та МРС регуляторів. Розглянутий алгоритм запобігання травмуванню на виробництві.

Розроблені методи автоматизації та керування окремими апаратами можна використовувати для виробництв з подібною структурою.

Ключові терміни: АНТРАЦИТ, ВУГЛЕЦЕВІ ВИРОБИ, ЕЛЕКТРОЛЬЦИНАТОР, ПРОЖАРЮВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, КЕРУВАННЯ, ЗОНИ, КОНТРОЛЬНІ ТОЧКИ, ПАРАМЕТР, ЗМІННА, МОДЕЛЮВАННЯ, РЕГУЛЯТОР.

## Abstract

The bachelor's graduation project executed made on "Carbon products baking process automation", contains 118 pages of explanatory notes, 33 illustrations, 4 tables, 1 apps, 1 drawings and 43 bibliographic items.

The goal is to create control system of a process.

The process of baking carbon products was investigated, created highly accurate ANSYS model of the process, identification of the process model was conducted, the properties of the control object were studied on the basis of a mathematical model, the settings for the PID and MPC regulators are made. The algorithm injury prevention in the workplace was reviewed.

The methods of process control can be used for a similar structure plants.

Key terms: ANTHRACITE, CARBON PRODUCTS, ELECTRIC CINTER, CALCINATION, TEMPERATURE, AUTOMATION, IDENTIFICATION, CONTROL, ZONES, CONTROL POINTS, PARAMETER, VARIABLE, MODELING, REGULATOR.







## ВСТУП

У нинішній розвиненій промисловості виробництво прожарювання вуглецю є неабияким важливим процесом, оскільки найбільше споживання в Україні припадає на промислові вуглецеві вироби. Продукція даного виробництва широко використовується в різноманітних галузях промисловості, які нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів: в чорній, кольоровій металургії, машинобудуванні та електронних приладів. Важливим етапом в даному виробництві є підтримка температури на заданому рівні, адже від температури залежать властивості, що визначають якість готової продукції.

Оскільки продукти процесу прожарювання вуглецевих виробів набули широке розповсюдження у виробництві, інженери цілеспрямовані до розробки новітніх або удосконалення старих технологій виробництва.

Автоматизація технологічних процесів набуває все більшого значення в проблемах зменшення енергетичних витрат, вартості виробленої продукції, а також людського фактору в системі управління. Якщо зменшити або взагалі виключити вплив людини на виробництво, то поліпшиться швидкість реакції, точний аналіз всіх даних, виробництво буде більш безпечним з вищими показниками якості виробленої продукції. Також метою автоматизації є підвищення ефективності праці, створенні умов для оптимального використання всіх ресурсів виробництва, підвищити якість виробленої продукції.

Автоматизація процесу прожарювання виробництва вуглецевої сировини дає можливість, не тільки контролювати та реєструвати режимні параметри виробництва, а й дистанційно керувати перебігом процесів у апаратах.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		9

# 1. РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ ШАХТНОГО ТИПУ

## 1.1 Загальна характеристика технологічного процесу виробництва вуглецевих виробів

Удосконалення процесів і обладнання для отримання та обробки вугільного матеріалу на основі впровадження новітніх досягнень науки і техніки є найважливішою умовою забезпечення народного господарства високоякісною вуглецевою продукцією.

Найбільше споживання в Україні припадає на промислові вуглецеві вироби, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різноманітних галузях промисловості, які нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Виробництво вуглеграфітової електродної продукції - важлива складова важкої промисловості, яка забезпечує економічну незалежність держави. Розвиток виробництва вугільної продукції в значній мірі визначає виробництво алюмінію, магнію, сталі, феросплавів, сірого і ковкого чавуну, карбїду кальцію, спеціальних марок сталей, тобто виробництво чорних та кольорових металів, машинобудування, хімічну промисловість та інші. За останні роки фахівцями науково-дослідних, проектно-конструкторських інститутів досліджено багато робіт щодо вдосконалення технології та обладнання процесів отримання і обробки вуглецевого матеріалу, який за своїми механічними і фізичними показниками задовольняє потреби багатьох галузей народного господарства.

Якість металургійної продукції багато в чому визначається властивостями вуглецевих виробів (графітових блоків, графітованих електродів, анодів і анодних мас), що застосовуються в технології її виробництва. Особливе значення це має в технологіях виробництва алюмінію і сталей в електродугових печах, де споживають відповідно 450-500 кг і 4,5-10 кг вуглецевих виробів на 1 т готової продукції [1-3]. Виробництво вуглецевих матеріалів є самостійним напрямком хімічної промисловості, оскільки ці матеріали все ширше

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		10

використовуються в техніці, наприклад, при виготовленні акумуляторних батарей для електронних приладів, електромобілів і т.д. У зв'язку з цим одним з основних завдань розвитку вуглецевої промисловості є підвищення якості продукції шляхом мінімізації шкідливих домішок в вуглецевих матеріалах [6-8].

Виробництво вуглецевих виробів є досить ресурсо- та енергозатратним. Окрім того, існує необхідність суворого дотримання великої кількості технологічних параметрів. Саме тому актуальною є задача ведення технологічних процесів в оптимальних режимах на ключових етапах виробництва з метою зменшення затрат та забезпечення високої якості продукції.

Таким чином, підвищення якості вуглецевих матеріалів безпосередньо впливає на основні показники і вдосконалення виробничих технологій. Основними тенденціями розвитку виробництва вуглецевих матеріалів є підвищення їх якості, в першу чергу, за рахунок підвищення чистоти самих матеріалів, а також розробка і впровадження енергоефективних методів їх термічної обробки.

## **1.2 Опис технологічного процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу**

Одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є термічна обробка вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу, де утворюються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на хід наступних технологічних процесів виробництва, так і на якість готової продукції. Тому задача підвищення ефективності процесу термообробки в електрокальцинаторі є дуже актуальною і в сучасних умовах може бути розв'язана шляхом створення ефективної системи оптимального керування даним процесом.

Початковою сировиною для виробництва вуглеграфітових виробів є нафтовий кокс, антрацит, природний графіт. Суть технологічного процесу

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	11
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

зводиться до нагрівання вихідного матеріалу до температури 2000 °С – 2700 °С з наступною витримкою, в процесі якої спостерігається часткова графітизація вихідної сировини, видалення сірки, летючих продуктів, металів і їх оксидів, що входять в склад золи, в тому числі ванадію, потрапляння якого, наприклад, в алюміній призводить до зниження його електропровідності [10].

Антрацити, що використовуються в складі електродної маси, повинні мати мінімальну кількість золи, сірки, вологи і високий вміст вуглецю, а також низький питомий електричний опір, високу механічну міцність і термостійкість, які визначають область їх використання [20].

При неправильної і неякісної технології підготовки сировини для виготовлення електродної продукції можуть виникати збої і поломки в металургійних агрегатах, що веде до збільшення витрат, тому дуже важливо підвищувати якість сировини для вуглеграфітової електродної продукції [20].

Для стабілізації властивостей вуглецевої сировини, що визначають її поведінку при подрібненні, пресуванні, випалу та графітизації, її потрібно піддавати термічній обробці (прожарювати).

Антрацит піддається термічній обробці для поліпшення комплексу фізико-механічних властивостей і підвищення термічної стійкості, зменшення електроопору і реакційної здібності, підвищення щільності структури. Необхідність проведення процесу прожарювання, в першу чергу, підтверджується об'ємної усадкою антрациту на 10-16% при високотемпературній обробці. В процесі прожарювання антрациту збільшується кількість вуглецю і знижується сумарний вміст летких речовин [20].

Прожарювання – термічна обробка сировини за високих температур без доступу повітря чи у відновлювальній атмосфері. В процесі прожарювання із сировини повністю видаляється волога та значна частина летючих речовин, що складаються здебільшого з горючих газів, збільшується густина, підвищується електропровідність та механічна міцність матеріалів. Прожарювання є одним з

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		12

найважливіших процесів, впродовж якого відбувається формування якісних характеристик та експлуатаційних властивостей вуглеграфітових матеріалів різного призначення. Після прожарювання матеріали стають стійкими до механічних впливів, збільшують свою стійкість до атмосферних впливів, а також різко збільшується їх теплопровідність, електропровідність та термоопір.

Вибір температурно-часових режимів прожарювання, найбільш придатних для отримання термоантрациту, визначається з одного боку необхідністю отримання матеріалу з більш високими показниками якості, а з іншого - досягненням високих якісних показників при менших питомих витратах енергоносіїв [20].

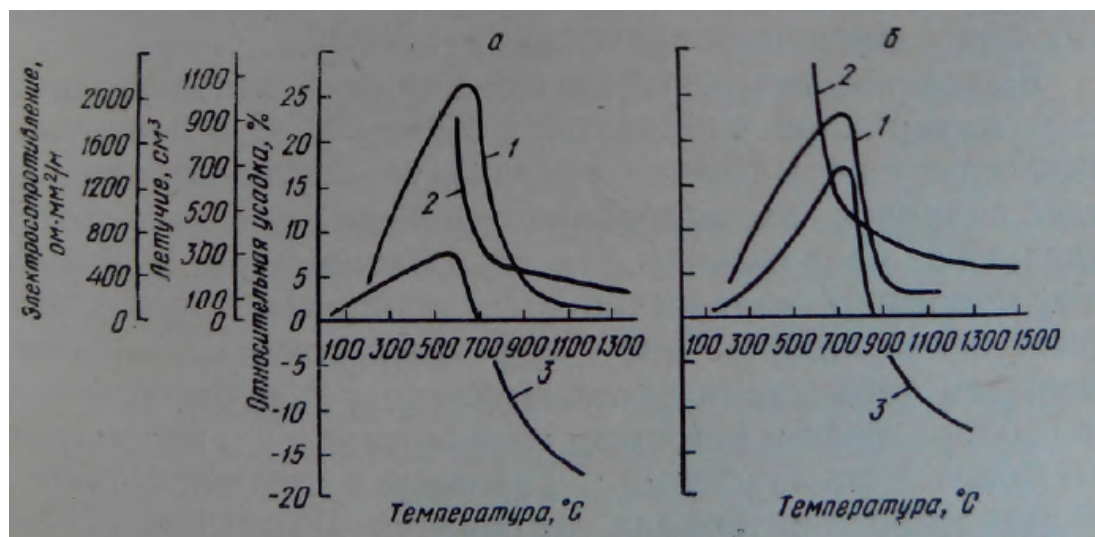


Рис 1. Зміна характеристик матеріалу, що прожарюється:

а-нафтовий крекінговий кокс; б-антрацит донецький; 1-виділення летючих; 2-питомий електроопір; 3-відносна усадка [1]

На рис. 1 наведені температурні залежності зміни властивостей при нагріванні нафтового коксу і антрациту. Результати досліджень показують, що при нагріванні вуглецевого матеріалу розміри шматків змінюються паралельно зміни його маси. Найбільші зміни об'єму відбуваються при температурах, при яких виділяється найбільша кількість летючих [3].

При нагріванні вуглецевих матеріалів відбуваються не тільки усадочні явища, а й глибокі структурні зміни, а також зміни фізичних і механічних

властивостей матеріалів. При прожарюванні відбувається зміна розмірів та маси частинок вуглецевої сировини. Зменшення маси пов'язана з видаленням з матеріалу вологи та летючих речовин. Зміна розмірів, пов'язана з ущільненням структури, є досить складним фізико-хімічним процесом, в якого на ранніх стадіях переважають хімічні зміни, а потім структурні перетворення [3].

При нагріві в інтервалі температур 100 – 400 °С сировина ніби повертається до температури коксування (піролізний та крекінговий кокс – до 420 – 460 °С, пековий кокс – до 850 – 1000 °С), матеріал стає неміцним, кокс розм'якшується та здимається. Спостерігається збільшення об'єму заготовок, причому зменшення маси не відбувається. Від 400 °С починається постійне виділення летючих, спостерігаються перші ознаки цементації виробів, однак механічна міцність їх дуже низька. Приблизно біля 500 °С – об'ємна усадка коксів. Відбувається затвердіння матеріалу, збільшення електропровідності і механічної міцності. Найбільш інтенсивні ефекти усадки в крекінговому та піролізному коксах проходять при температурах максимального виділення летючих (550 – 700 °С). Об'ємна усадка цих коксів, що містять в середньому 6,5 % та більше летючих речовин, складає 20 – 24%, а для окремих частинок, як наслідок неоднорідності їх по умовам коксування, – до 30% чи більше. У пекового коксу, що містить близько 1% летючих, при 700 °С усадка мінімальна (до 0,3%), оскільки вона частково вже пройшла в процесі коксування. Основна маса летючих речовин виділяється до 600 °С. При подальшому нагріванні різко зростає електропровідність. Чорний колір поверхні заготовок переходить в однорідний сірий колір [1].

Вище 700 °С зміна властивостей сповільнюється, хімічні процеси поступово згасають. Зовнішня і внутрішня усадка поступово зменшується, а справжня щільність, пористість, а також міцність, твердість і електропровідність збільшуються.

В інтервалі температур 700 – 1000 °С летючі речовини, що виділяються, майже повністю пірогенетично розкладаються до елементарного вуглецю та

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		14

водню. В цьому інтервалі швидкість газовиділення зменшується, але зростає глибина піролізу, і як наслідок, відбувається ущільнення структури коксів. Цьому також сприяє одночасне (вище 700 °C) деяке впорядкування молекулярної структури коксів. Відомо, що чим більше здатний кокс до трьохмірного упорядкування, тим при більш низькій температурі прожарювання спостерігається його максимальна усадка і густина матеріалу, що визначається усадкою.

При прожарюванні вуглецевої сировини до 1200 °C її електропровідність зростає на 3-5 порядків. На зміну електропровідності при незмінних температурах прожарювання суттєво впливає швидкість нагріву та час витримки при максимальній температурі. Показниками, що характеризують ступінь прожарювання вуглецевої сировини, можуть бути його питомий електричний опір, пікнометрична густина та залишковий вміст в ньому водню.

Для більшості вуглецевих матеріалів оптимальну температуру прожарювання обирають, виходячи з умов зниження вмісту водню до 0,05%.

Було б неправильно вважати, що структурна перебудова вуглецевих матеріалів визначається тільки в результаті хімічних процесів, що протікають при тих чи інших температурах. Спостерігаючи за зміною електричного опору нафтового коксу при нагріві, можна легко помітити різке зменшення опору при температурі близько 700 °C. Це явище спричинене утворенням карбоїдної структури. На цій стадії ущільнення починається різка зміна характеру молекулярної структури. Розміри плоских молекулярних шарів при цій температурі досягають великих розмірів. Внаслідок великої анізотричності ці шари намагаються розміститись паралельно одне одному, утворюючи невеликі стопки. Цей процес також призводить до ущільнення структури. Зниження електричного опору є наслідком того, що електрони четвертих валентностей атомів вуглецю виходять в простір між атомними шарами, що складені в стопки, і стають легко рухомими. В ароматичній структурі вони міцно зафіксовані в її межах [3].

Отже, процес ущільнення структури вуглецевої сировини при прожарюванні потрібно розглядати як складний фізико-хімічний процес, в якого на ранній стадії переважають хімічні процеси, але з підвищенням температури роль хімічних процесів зменшується.

Також було б неправильно робити висновок, що за межами температур 1300 – 1400 °C припиняються фізико-хімічні процеси, а отже, ущільнення та зміна об'єму вуглецевої сировини. При подальшому нагріві вуглецевих матеріалів їх ущільнення також буде протікати доволі інтенсивно. Але сутність цих процесів вже буде іншою. При прожарюванні закінчуються в основному процеси, що відповідають утворенню плоских вуглецевих сіток. При більш високих температурах проходять процеси, що призводять до трьохвимірного впорядкування атомів вуглецю.

Зміна фізико-хімічних властивостей вуглецевих матеріалів в процесі їх прожарювання також визначається характером газовиділення та первинною усадкою матеріалів. Різке збільшення електропровідності, дійсної густини, механічної міцності є результатом доволі інтенсивного процесу піролізу вуглеводнів, з яких складається матеріал та обумовленого цим процесом ущільнення матеріалів. При завершенні процесу піролізу та стабілізації усадки стабілізуються також фізико-хімічні властивості матеріалів [20].

Під час прожарювання антрациту в міру підвищення температури відбувається упорядкування його структури (аж до кристалічної решітки графіту) і, як наслідок, змінюються фізико-хімічні властивості [20]. Відбуваються такі структурні перетворення:

- видаляються леткі сполуки (в тому числі і S-містять сполуки);
- збільшується щільність і механічна міцність;
- впорядковується вуглецева структура;
- збільшується електропровідність.

Збільшення щільності та механічної щільності:



- При температурах 700 – 750 °С летючі продукти виділяються в результаті прямої дистиляції з частковим піролізом. Пористість збільшується приблизно до 1200 °С.
  - Утворений вуглець відкладається щільним шаром в порах і на поверхні матеріалу, прожарюється, збільшуючи щільність матеріалу.
  - Одночасно з піролізом відбувається конденсація і полімеризація вуглеводнів із збагаченням їх вуглецем, що і обумовлює усадку.
  - Цей процес завершується утворенням плоских вуглецевих сіток (плоских вуглецевих гексагональних решіток). Але на цьому етапі ще не відбувається утворення тривимірної впорядкованої структури [20].
- Схему послідовності структурних перетворень антрациту з утворенням графіту можна побачити на рисунку 2.

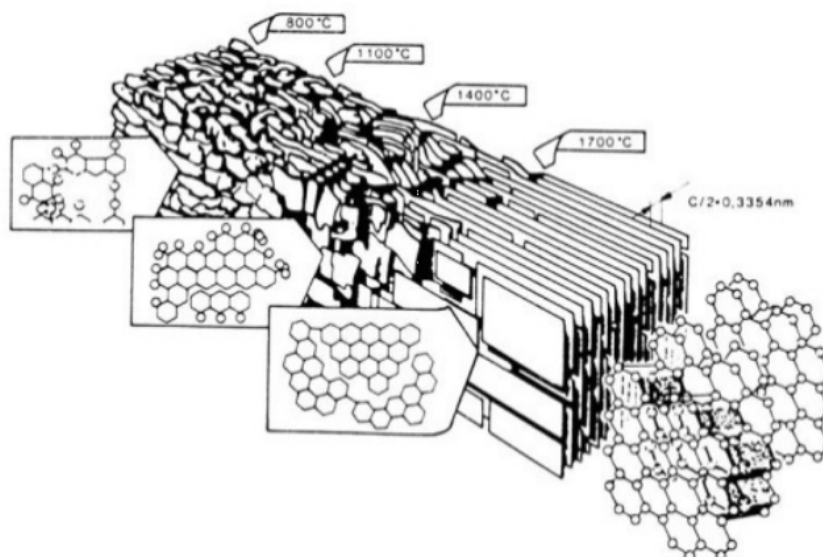


Рис. 2 Загальна схема послідовності структурних перетворень антрациту з утворенням графіту [20]

Зміна електроопору:

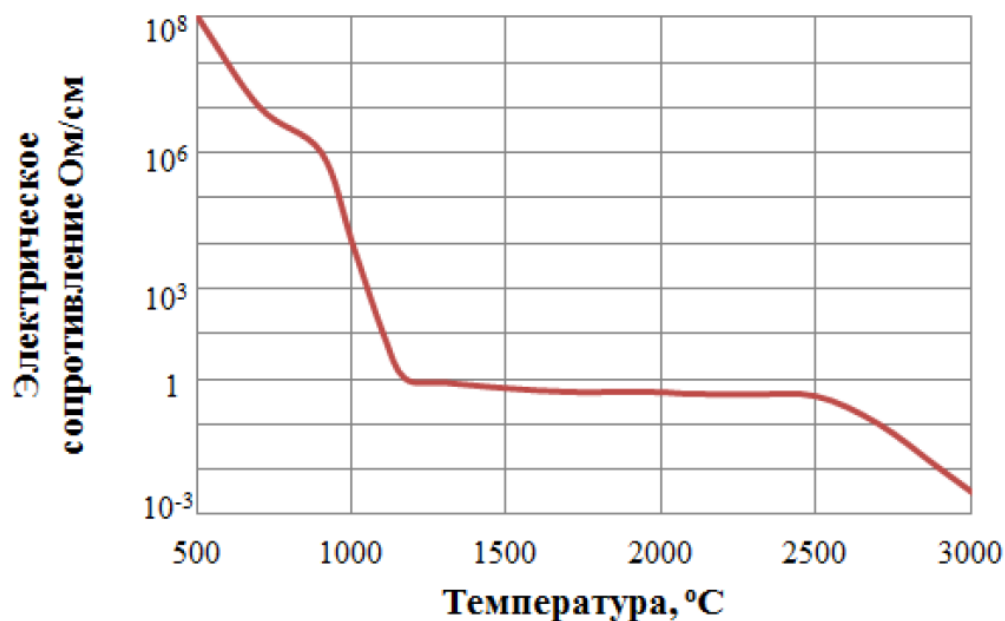


Рис. 3 Зміна електроопору антрациту в залежності від температури прожарювання згідно [20]

Можна виділити чотири температурні інтервали:

- 500 – 700 °C - дуже високий електричний опір;
- 2) 700 – 1200 °C - різке падіння опору;
- 3) 1200 – 2100 °C - зміна відсутня;
- 4) вище 2100 °C - нове – падіння опору (початок процесу графітації) [20].

Виходячи з цього положення в промисловій практиці встановлюються оптимальні температури, а також показники для якісної оцінки процесу прожарювання вуглецевих матеріалів. Показники, що характеризують степінь прожарювання, можуть бути різними – електропровідність, дійсна густина, вміст водню та інші. Вибір методу для оперативного керування процесом прожарювання визначається виходячи з міркувань мінімального часу, потрібного для визначення, точність визначення та його відтворюваність. В промисловій практиці частіше всього використовують визначення електропровідності обробленого матеріалу [3].

Постійне вдосконалення технологій виплавки чавуну, сталі, феросплавів, кольорових металів і сплавів обумовлює необхідність подальшого розвитку

виробництва, підвищення якості і конкурентоспроможності вуглеграфітових виробів [4]. Як наслідок підвищуються вимоги, що ставляться до матеріалів з яких виготовляються ці вироби. В даний момент розроблена та удосконалюється технологія графітування нафтового коксу в електричних печах шахтного типу [5], що дозволяє при витримці коксу впродовж 2 годин на рівні 2200 °С отримувати оброблений матеріал з питомим електричним опором < 150 мкОм·м [6]. За свідченням авторів [5] мінімальний рівень температур в зоні прожарювання визначає якісні характеристики матеріалу, що вивантажується:

- понад 1300 °С - видалення летючих з матеріалу
- понад 1700 °С - видалення сірки з прожарюємого матеріалу;
- понад 2200 °С - часткове або повне графітування матеріалу.

За умови рівномірного прожарювання матеріалу даним методом вироби з такого матеріалу матимуть менший електричний опір (що є одним з основних якісних показників даних виробів [7]) в порівнянні з виробами з матеріалів, оброблених іншими методами.

### **1.3 Конструктивні особливості процесу прожарювання вуглецевих виробів**

Вуглецеві заготовки прожарюють в спеціальних печах відмінних за будовою. Структуру печі вибирають з урахуванням технології виробництва, економічної оцінки і місцевих заводських умов.

Прожарювання антрациту здійснюють в барабанних обертових печах, в електрокальцинаторах або в ретортних печах, також існує змішана технологія. Основним завданням процесу прожарювання антрациту є зменшення кількості летючих речовин, яке покращить фізико-хімічні властивості антрациту, які в подальшому стануть корисними у виробництві електродної продукції. Оскільки антрацит є сировиною, яка важко прожарюється, то для отримання на його основі електродної продукції, необхідно вдосконалювати технології його розжарювання [4, 10, 14].

Ці печі різні за конструкцією та за технологічними умовам прожарювання сировини. Вони відрізняються за видом теплоносія, умовами теплопередачі і атмосферою, в якій відбувається прожарювання. Атмосфера при прожарюванні дуже впливає на поверхневі властивості матеріалів.

#### *Електричні печі*

Електричні печі використовують головним чином для прожарювання антрацитів і нафтових коксів. Незважаючи на різноманітність конструкцій печей, технологічні умови обслуговування їх зводяться до одних і тих же операцій в – завантаження і розвантаження матеріалу і температурний режим.

В порівнянні з печами інших типів електричні мають ряд переваг: широкий діапазон температурних режимів, можливість автоматизації процесу прожарювання, простота і низька вартість конструкції, малі виробничі площі, використання електроенергії. До недоліків електрокальцинаторів слід віднести: низький ККД печі, підвищений угар вуглецю матеріалу, забруднення атмосфери цеху газами і неоднорідність матеріалу, що прожарюється [1].

Завантаження всіх печей повинно проводитися рівномірно і невеликими порціями, такий режим завантаження забезпечує рівномірність прожарювання. Найбільш жорсткі вимоги ставляться до гранулометричного складу матеріалу, що прожарюється. Основна вимога полягає в сталості гранулометричного складу матеріалу. Також гранулометричний склад визначає електричний опір завантаженого матеріалу і, отже, електричний режим (в кінцевому рахунку - тепловий режим). При порушенні прийнятого гранулометричного складу змінюється опір завантаження і, отже, порушується температурний режим [1].

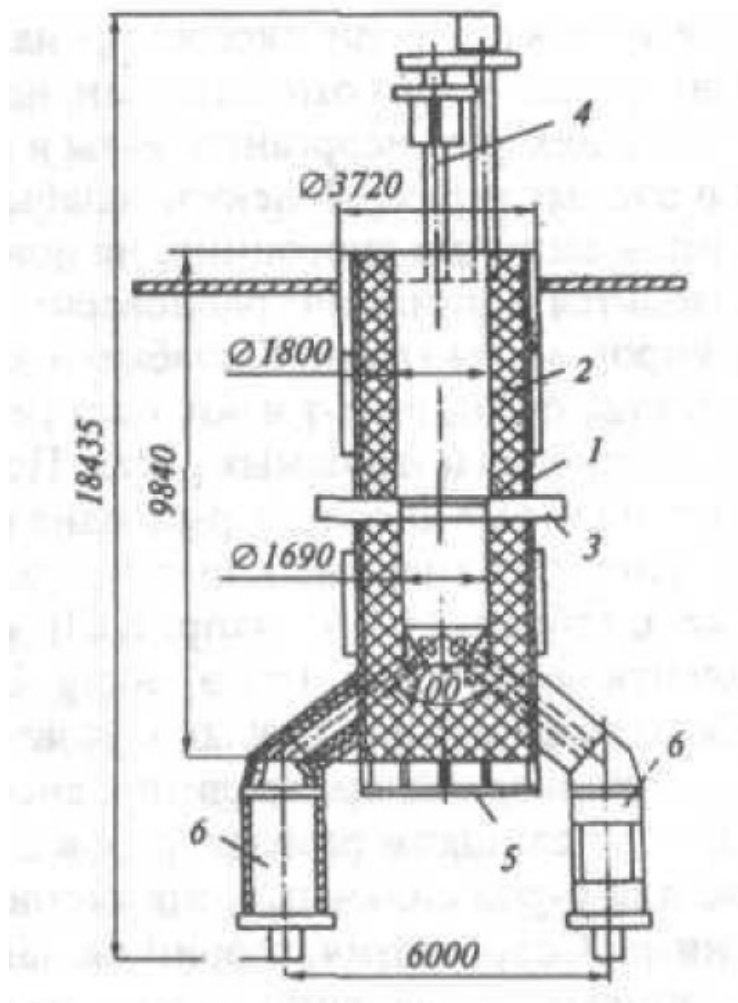


Рис. 4 Електрокальцинатор ІЕТ-10: 1-верхній підвісний електрод; 2- камера, де відбувається прожарювання; 3-нижній кільцевий електрод; 4-камера термостатування; 5-холодильник; 6-розвантажувальний пристрій [1]

На рис. 4 показана конструкція електрокальцинатора ІЕТ-10. Позитивним фактором є наявність в печі камери термостатування, що дозволяє більш-менш вирівняти температуру між окремими частинами і усереднити властивість матеріалу, що прожарюється [1].

Нагрівання матеріалу в електрокальцинаторі здійснюється внаслідок перетворення електричної енергії в теплову. Електрокальцинатор є однофазною піччю опору. Між окремими частинами матеріалу, що прожарюється, можуть утворитися електричні дуги, в результаті чого виникають місцеві перегріви, і в цих місцях відбувається графітація матеріалу. Зазвичай ступінь графітації

становить 10-15%, але в окремих випадках може досягати і 40% [1].

Велике значення надають стабільності і однорідності гранулометричного складу, тому розміри частинок матеріалу не можуть перевищувати 25 мм, також зерна не повинні бути дрібніше 6 мм. Діапазон 6-25 мм для величини частинок занадто великий. Він повинен бути значно вужче, наприклад, 6 – 12 або 15-25 мм [3].

Для антрациту зазвичай приймають розміри зерен такими, щоб після прожарювання, без додаткової операції подрібнення, він надходив до наступного етапу виробництва. Необхідний гранулометричний склад матеріалу для прожарювання готується на заводі. Економніше отримувати з шахт готовий відсортований антрацит необхідного гранулометричного складу. Видалення дрібних фракцій необхідно ще й для того, щоб забезпечити рівномірне проходження матеріалів по перерізу стовпа завантаженого матеріалу. Особливо важливо це зауваження для печі з підвісним електродом, в якій переріз шахти дуже великий. Дрібні фракції нафтового коксу мають велику схильність до спікання, що також негативно впливає на процес.

Для забезпечення нормальних умов роботи печі необхідне симетричне проходження матеріалу навколо електрода. Це є ознакою того, що матеріал проходить рівномірно по всьому об'єму печі. Якщо порушується нормальний хід матеріалу, то в місцях зависання температура сильно підвищується, збільшується провідність матеріалу і відповідно зростає струм, що може привести до перегріву частини матеріалу і навіть до сплавлення футеровки. У цих випадках амперметр майже не зазначає падіння сили струму при завантаженні свіжого матеріалу. Для виправлення ходу печі рекомендується зупинити її, трохи остудити і видалити частини, що спеклися [3].

Технологічні умови обслуговування електрокальцинаторів зводяться до завантаження та розвантаження матеріалу і підтримці теплового режиму регулюванням кількості електроенергії, введеної в піч. Завантаження і вивантаження здійснюють періодично малими порціями по 10-20 кг або

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		22

постійно. Тепловий режим регулюють за показаннями амперметра або лічильника електроенергії. При періодичному завантаженні вивантаження виконують при максимальних показаннях амперметра, що вказує на зниження електроопору матеріалу [1].

Витрата електроенергії на 1 т матеріалу, що прожарюється становить 400-1200 кВт·год. Летючі речовини, які виділилися рекомендується спалювати в утилізаційних установках [1].

Матеріал для прожарювання знаходиться в бункері над піччю. У печі повинен бути постійно надлишок матеріалу, що забезпечить відсутність згоряння матеріалу і електрода. Надходження матеріалу в піч регулюється вивантаженням. Для цієї мети розвантажувальна апаратура налаштовується на таку швидкість проходження матеріалу через піч, яка забезпечує задані умови прожарювання. Якщо ж є ручне завантаження печі (старі конструкції), то одночасна порція вивантаження матеріалу повинна бути не більше 10 кг [3]. Як часто здійснювати вивантаження чергової порції матеріалу, визначається, як вище сказано, заданими умовами прожарювання.

Про температурний режим узагалі не доводиться говорити, тому що неможливо проводити вимірювання температури в зоні прожарювання. Тому режим зазвичай ведеться за показаннями електричних приладів, припускаючи, що встановлений режим введення електроенергії в піч забезпечує задану температуру прожарювання. Тому режим прожарювання буде залежати від кількості енергії, введеної в піч, а також від швидкості руху матеріалу в печі. Оскільки потужності встановлених трансформаторів обмежені, то і швидкість руху матеріалу також має межу. Отже, обидві величини пов'язані між собою і для досягнення найбільшого економічного ефекту слід проводити процес, використовуючи всю встановлену трансформаторну потужність. У цьому випадку продуктивність печі буде найбільшою [3].

Практично режим прожарювання проводиться або за показаннями амперметра або за показниками лічильника енергії. За свідченнями амперметра легше вести процес.

Вивантаження чергової порції матеріалу проводиться при максимальній силі струму, допустимої для трансформатора. Після того як свіжий матеріал надійде в робочу зону, опір завантаження зростає і сила струму зменшиться, оскільки напруга залишається постійним.

Через деякий час завантаження нагріється до заданої температури, опір матеріалу знизиться, показання амперметра знову зростуть до максимального межі і знову проводиться вивантаження і т. д.

### *Обертові Печі*

Обертові печі дуже поширені в виробництві різних електродних виробів. Вони мають високу продуктивність, вимагають нечисленний обслуговуючий персонал, а дозволяють автоматизувати роботу всього процесу прожарювання. До недоліків слід віднести найбільший відсоток згоряння вуглецю в порівнянні з печами інших конструкцій. Чад досягає до 10% [3].

Технологічний режим роботи печі полягає у виборі об'ємного завантаження барабана печі і швидкості проходження матеріалу через піч, а також температурних і тягових умов.

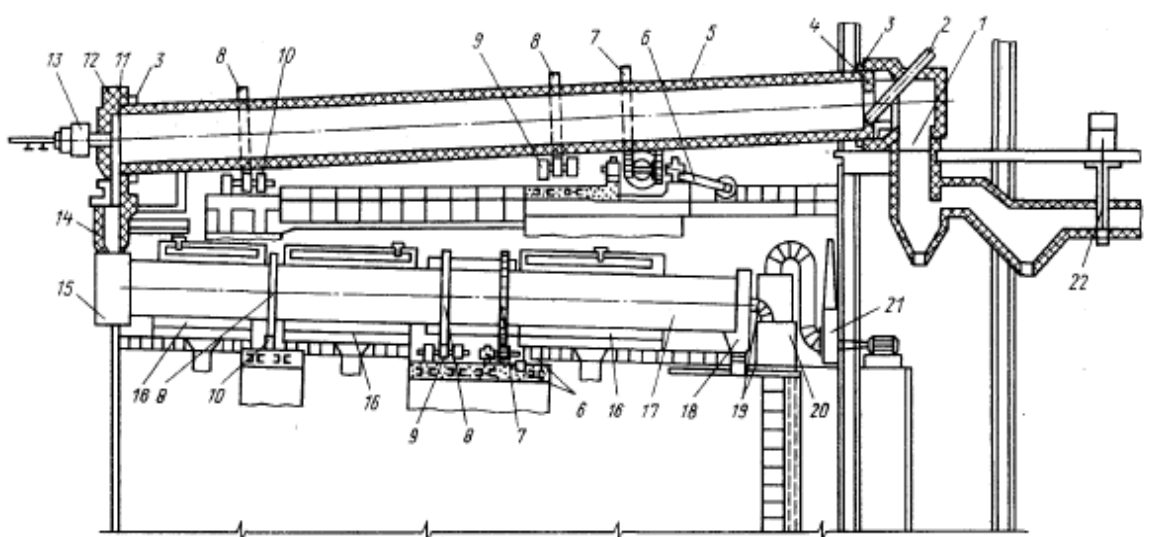




Рис. 5 Агрегат печі, що обертається: 1-пилова камера; 2-завантажувальна секція; 3-вузол ущільнення головок печі; 4- підпірне кільце; 5-корпус печі; 6-привід; 7-зубчастий вінець; 8-бандаж; 9-опорна станція (1); 10-опорна станція (2); 11-захисне кільце; 12-нижня головка печі; 13-газопальниковий пристрій; 14-перевантажувальна секція; 15-верхня головка холодильника; 16-ванна холодильника; 17-корпус холодильника; 18-нижня головка холодильника; 19-повітрозабірник; 20-рукавний фільтр; 21-димосос; 22-шибер [1]

Обертові печі є складним, нелінійним, з великим числом неконтрольованих основних параметрів і збурень об'єктом, який важко піддається математичному опису та управління. Управління зведено лише до підтримання режимних параметрів процесу на рівні, часто задаються інтуїтивно, що забезпечує з певною ймовірністю необхідні якісні показники. З огляду на це найбільша кількість патентів і науково-технічних публікацій присвячено розробці структури АСУ ТП і особливо її верхнього рівня, а також застосування в них нових технічних засобів контролю і управління [19].

Зусилля дослідників спрямовані на те, щоб забезпечити автоматичний контроль температур в деяких точках по довжині печі і регулювання котрих з них. Як правило однієї з таких температур є температура газів, що відходять (холодний кінець печі), а інший температура футеровки поблизу розвантажувального кінця печі. В системі управління залучається використання в якості керуючого впливу - зміна швидкості обертання печі, яка мабуть найбільшою мірою, після завантаження матеріалу, впливає на технологічний процес печі. Однак саме по собі використання даного керуючого впливу навіть в комбінації з іншими, стандартними для обертової печі керуючими впливами (розрідження, витрата палива, витрата повітря на спалювання палива і летючих компонентів) не є гарантією ефективності роботи АСУ ТП [19].

Барабанна піч, що обертається, складається з корпусу з захисними і підпірними кільцями, опорних бандажів, зубчастого вінця, опорних станцій, приводу, головки, пилової камери, вузлів ущільнення головок і футерування.

Незважаючи на те що конструкція печі жорстка, вона забезпечує узгоджене теплове розширення окремих елементів, що гарантує міцність апарату і збереження футерування [1].

Корпус печі складається з окремих секцій, зварених зі стандартних сталевих листів. Секції між собою з'єднані теж зварюванням. На кінці корпусу барабана з боку входу теплоносія встановлено захисне кільце, що екранує горіць футерування "гарячого" кінця печі і запобігає осьовий зсув футерування [1].

На корпусі печі закріплені бандажі, які спираються на ролики. Ролики розміщені на масивних сталевих плитах, вмонтованих в залізобетонні фундаменти таким чином, що піч злегка нахилена до горизонту в сторону "гарячого" кінця барабана. Корпус печі між точками працює на вигин. Допустима напруга металу на вигин визначає вибір товщини корпусу барабана і відстані між опорами, які зростають зі збільшенням діаметра апарату. Під опорними бандажами і зубчастим вінцем знаходяться підсилювальні кільцеві насадки такої ж товщини, як і корпус, або тонше. При нерівномірному розподілі навантаження на корпус барабана, викликаному дефектами монтажу та регулювання печі, а також різкими відхиленнями його температури від норми, виникають дотичні напруження, які можуть деформувати або навіть зруйнувати корпус. Тому необхідно ретельно перевіряти концентричність посадки бандажів, перекіс роликів, застосовуваний для утримання печі в середньому положенні уздовж її осі, щільність прилягання футеровки до корпусу і тд [1].

Обсяг завантаження барабана залежить від розмірів робочого барабана і коливається в межах 6-15%. Чим більше діаметр барабана, тим нижче відсоток його заповнення. Наприклад, при внутрішньому діаметрі барабана 1 м і менше допускається заповнення обсягу барабана близько 15%, а при діаметрі 2,5 - 3 м - тільки 6%. Занадто високий відсоток заповнення барабана погіршить умови теплопередачі, що в кінцевому підсумку знизить продуктивність печі. При

зниженні відсотка заповнення відповідно буде знижуватися продуктивність печі. Час перебування матеріалу в печі має бути не менше 30 хв. [3].

Всю довжину пічного барабана слід розділити на три зони відповідно до послідовного ходу технологічних перетворень [3]. Перша зона - зона підсушування та підігріву матеріалів, здійснювана газами. Це найбільш довга зона, в якій прагнуть повніше використовувати тепло відхідних газів. Температура димових газів на початку зони близько 1100 °С, а в кінці повинна бути близько 400 °С. Якщо температура газів, що виходять з печі вище 400 °С, то це є показником ненормальних умов ведення режиму. Друга зона - зона прожарювання. Довжина її визначається довжиною факела горіння мазуту або газу і зазвичай знаходиться в межах 3 - 4 м. Якщо в матеріалах міститься велика кількість летючих, ця зона може збільшитися до 8 - 10 м за рахунок згоряння летучих. Це - зона максимальних температур, що досягають 1350 - 1400 °С. Матеріал в ній нагрівається до 1200 - 1250 °С. Третя зона - зона охолодження - розташовується перед факелом, тобто в передній частині барабана, від передньої головки до зони прожарювання. Це найбільш коротка зона і повинна бути в межах 1,5 - 2 м.

Найбільше значення має довжина і особливо розташування зони прожарювання, бо від цього залежить величина чаду (згоряння вуглецю матеріалу) і температура газів, що відходять. Зона прожарювання розташовується на мінімально допустимій відстані від передньої головки печі, забезпечуючи її збереження. Зона прожарювання в залежності від умов в печі може пересуватися по довжині барабана. У разі великого віддалення зони прожарювання від передньої головки печі різко зростає чад (спалювання) вже обробленого матеріалу. Пояснюється це тим, що повітря, яке необхідне для спалювання летучих, що виділяються в зоні прожарювання, надходить через передню головку і проходить над шаром розпеченого матеріалу, спалюючи його. Чим довше буде ця ділянка, тим більше згорить матеріалу, тим менше

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		27

повітря надійде в зону прожарювання, і тим менш ефективно буде протікати згоряння летучих речовин.

За положенням зони прожарювання слід уважно спостерігати, бо вона має суттєвий вплив на роботу печі. Пересування цієї зони як в одну, так і в іншу сторону неприпустимо. Однак на практиці досить часто ця зона може переміщатися. Якщо зона почала наближатися до передньої головки, необхідно призупинити процес і повернути її в колишнє положення. Для цього існують кілька прийомів, які полягають у зміні розрідження; в разі катастрофічного положення зупиняють обертання барабана і відключають форсунку. Якщо ж зона прожарювання пересувається в протилежну сторону, то слід дещо зменшити розрідження, а після того як зона прожарювання встановиться в нормальних межах, знову повертаються до оптимальних умов розрідження.

Управління режимом печі, а також зоною прожарювання можливо тільки при повній герметизації печі. Тому технічний стан і особливо герметизація печі впливають як на технологічні умови, так і на роботу печі в цілому.

Температурний режим в печі підтримується спалюванням газу або мазуту. При прожарюванні таких матеріалів, як нафтовий кокс, в якому міститься велика кількість летучих, за рахунок спалювання летучих речовин знижується споживання горючих. Однак це одночасно вносить ускладнення в управління температурним режимом печі. Температура газів, що відходять під час прожарювання нафтового коксу значно вище, ніж при прожарюванні антрациту. Пояснюється це тим, що через нестачу повітря частина летучих не згорає та в зоні розжарювання, а догорає, потрапляє в задню головку печі, де проходить повітря через нещільності завантажувальних пристроїв. При нормальних умовах роботи печі розрідження в задній голівці печі повинно бути 2 - 5 мм вод. п. Тягові пристрої дозволяють регулювати розрідження в печі в межах 1 - 20 мм вод. ст. [3].

В обов'язки обслуговуючого персоналу входить спостереження за температурним режимом, характером полум'я, зоною прожарювання, об'ємом завантаження і поведінкою матеріалу в печі, за тяговим режимом і роботою пальників. Всі ці елементи технологічного режиму відповідно пов'язуються з числом оборотів барабана, а також технічним станом печі.

При сталому режимі роботи печі, що забезпечує продуктивність і якість матеріалу, всі зазначені характеристики процесу знаходяться в тісній залежності. Зміна одного будь-якого параметра вимагає пристосування всієї системи до нових умов. Наприклад, зміна величини навантаження нафтового коксу спричинить за собою зміну кількості летючих. Щоб спалити їх, потрібна зміна кількості повітря, а це в свою чергу призведе до зміни тягових умов. Зміна кількості летючих призводить до пересування зони прожарювання, а також до зміни її довжини.

#### *Ретортні печі*

Технологічні операції в ретортних печах, як і в печах інших конструкцій, зводяться до завантаження та вивантаження матеріалу, теплового і тягового (гідравлічного) режимів.

Швидкість, як і кількість подачі матеріалу в піч, залежить від продуктивності, яку в змозі забезпечити піч при оптимальному температурному режимі. Продуктивність печей по нафтовому коксу для проточних печей близько 70 - 75 кг / год з реторти, а для протиточних печей 100 кг / год [3]. Найбільш однорідний кокс отримують в ретортних печах. У них матеріал нагрівається теплом димових газів, що передаються через стінку з вогнетривкої цегли [1]. Агрегат (рис. 5) складається з власне печі, що включає в себе реторти і обігрівальні канали, рекуператора, системи газовідводів, газопроводів, системи контрольно-вимірювальних приладів і управління [1].

Піч становить металевий короб, зафутерований зсередини шамотною і динасовою цеглою. Вся піч розділена на рівні за об'єктом секції, в кожній з яких розміщено по дві пари реторт з динасу. Кожна реторта забезпечена в

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	29
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

верхній частині завантажувальним патрубком, в нижній - двома симетричними розвантажувальними патрубками, в яких встановлено охолоджувальний пристрій - ватержакети. Завантажувальні і розвантажувальні пристрої на патрубках здійснюють дозування коксу і служать для герметизації відповідних отворів реторти. Пара реторт з'єднана між собою і зі стінками секції печі горизонтальними плитами, що утворюють з двох сторін кожної реторти по шість обігрівальних каналів. Кожен канал забезпечений оглядовим люком. У електродної підгалузі використовують 8-, 12- і 16-ретортні печі. Останнім часом з метою інтенсифікації процесу прожарювання зроблені спроби реконструювати 8-ретортні печі в 10-ретортні, для чого на місці перегородки, що розділяє дві секції печі, розміщують додаткову пару реторт [1].

Температура матеріалу в міру просування його вниз підвищується, починається виділення летючих речовин з коксу, що прожарюється. Летючі речовини збираються під склепінням реторти, та внаслідок різниці тисків вони потрапляють через систему газовідводів в нижній опалювальний канал. Спалювання летючих можна проводити як на виході газових пальників з фронтальної частини печі, так і у протилежної (задньої) стінки [1].

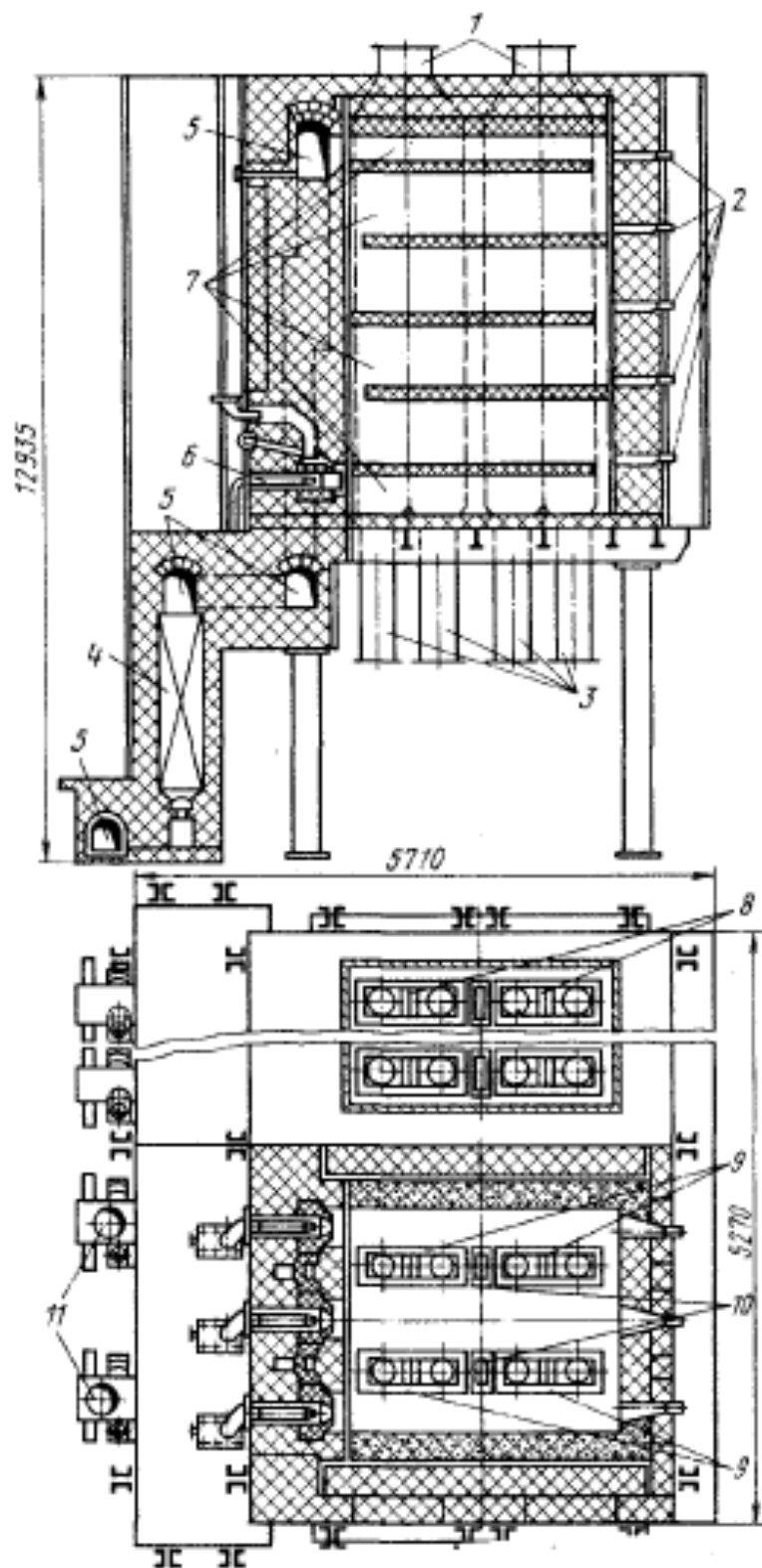


Рис. 6 Восьміретортна піч противоточного типу: 1-завантажувальні патрубки; 2-оглядові люки; 3-ватержакети; 4-рекуператор; 5-газохід; 6-пальник; 7-обігрівальні канали; 8-розсікач; 9 реторти; 10-вертикальні канали для летючих; 11-канал для підведення до пальника гарячого повітря [1]

Матеріал слід завантажувати в піч невеликими порціями (2 - 3 кг), причому швидкість подачі матеріалу повинна бути постійною, що дуже важливо для забезпечення рівномірного виділення летючих речовин, які підводяться і спалюються в печі. Для нормальної роботи пальника необхідно систематичне надходження летючих при постійному тиску. При порушенні режиму завантаження змінюється кількість летючих, що виділяються, змінюється тиск в реторті, що викликає порушення режиму горіння.

Швидкість проходження матеріалу через піч регулюється вивантаженням, яка визначається технологічними умовами і температурним режимом печі. Температура вивантажується матеріалу не повинна бути вище 100 °С. Для охолодження матеріалу застосовують ватер-жакети, для нормальної роботи яких необхідно стежити, щоб температура води, що виходить з ватер-жакетів, була не вище 50 - 55 °С [3].

При проходженні матеріалу через піч в результаті усадки і головним чином за рахунок стирання змінюється його гранулометричний склад. Нафтовий кокс стирається в більшій мірі, ніж антрацит або пековий кокс. Наприклад, якщо у вихідному нафтовому коксі фракція - 0,2 мм становила 12,5%, то в прожареному вона зросла до 35% [3].

Температурний режим в процесі прожарювання ведуть за показниками приладів, що вимірюють температуру газового потоку. Вимірювання температури проводиться в кінці вогневого каналу, в якому проводиться спалювання газу. Температура в цій точці повинна бути 1350 °С. Різке зниження температури матеріалу, що прожарюється, починається з надходження його в ватер-жакет.

Спалювання газу слід проводити таким чином, щоб уникнути короткого або кіптявого полум'я. Дуже важливо при спалюванні газу домогтися довгого жовтого полум'я. Довгий факел забезпечує «далекобійність» полум'я, отже, рівномірний нагрів по всій довжині реторти. У димових газах на виході з печі не повинно бути окису вуглецю, кількість кисню не повинен перевищувати



2,0-2,5%. У прямоточній печі в зону максимальних температур надходить холодний матеріал, а на рівні вогневого каналу він нагрітий всього до 250 – 300 °С. У міру просування матеріалу вниз одночасно знижується температура в наступних обігрівальних каналах. Отже, створюються умови, що знижують граничну температуру прожарювання. Це є великим недоліком прямоточних печей. Протиточні печі позбавлені цього недоліку, тому в цих печах досягаються більш високі температури в матеріалі, що дозволяє поліпшити якість прожарених матеріалів і збільшувати продуктивність в порівнянні з прямоточними печами.

Тому природно прагнення збільшити зону високих температур в обігрівальних каналах прямоочної печі. Це може бути досягнуто запалюванням пальників в другому і навіть в четвертому каналі. До цих пальників можна підвести тільки летючі речовини, що виділяються в печі. У цьому випадку доводиться стикатися з труднощами доставки повітря для спалювання летучих. Збільшення зони високих температур може бути досягнуто подовженням полум'я, для чого потрібне збільшення розрідження. Але цей спосіб менш економічний, тому що призводить до збільшення згоряння матеріалу і ускладнює управління летючими речовинами, що виділяються.

Тяговий режим (гідравлічний режим) визначає не тільки тепловий режим печі і умови теплопередачі, але і впливає на величину тиску летучих в реторті. Нормальне розрідження на печі, виміряне перед рекуператором, має перебувати в межах 5 - 8 мм вод. ст. Розрідження в зоні вогневого каналу має бути 2 - 3 мм вод. ст. [3].

Для запобігання згоряння матеріалу, а також для створення умов, при яких летючі легко транспортуються до пальників, слід підтримувати позитивний тиск газів в реторті. Практично це тиск, виміряний у верхній частині реторти, має становити близько 1 мм вод. ст., але не вище. Тиск газів в реторті регулюється розрідженням в печі. Тиск в реторті не однаковий по висоті реторти. Тиск знижується зверху вниз, і в нижніх частинах реторти

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		33

спостерігається розрідження, яке біля розвантажувальних пристроїв досягає 2 - 3 мм вод. ст. В результаті нещільностей, наявних у розвантажувальних пристроїв, в реторту засмоктується повітря і спалює розпечений матеріал. Зі збільшенням розрідження і погіршенням герметизації розвантажувальних пристроїв зростає угар матеріалів.

Серед усіх розглянутих печей для обробки вуглецевих матеріалів за температур вищих 2000 °С підходять лише електричні печі, адже тільки в них, завдяки принципу їх роботи, можливо досягти таких значних температур. Тому в подальших розділах буде розглядатися лише термічна обробка вуглецевих матеріалів в електричних печах шахтного типу.

Тривалість терміну служби ретортних печей 3-4 роки і лімітується вона станом футеровки. Як показав досвід експлуатації таких печей в інших галузях промисловості та на електродних заводах, подовжити їх термін до 4-6 років і підняти продуктивність однієї реторти з 60-80 до 80-100 кг / год можна, збільшивши число опалювальних каналів з 6 до 7 і організувати спалювання палива не в одному, а в чотирьох каналах [1].

#### **1.4 Параметрична схема процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу**

Для ефективного керування процесом термічної обробки вуглецевої сировини необхідно провести дослідження впливу технологічних параметрів на фізичні поля робочого простору електрокальцинатора, що показано на рис. 7.

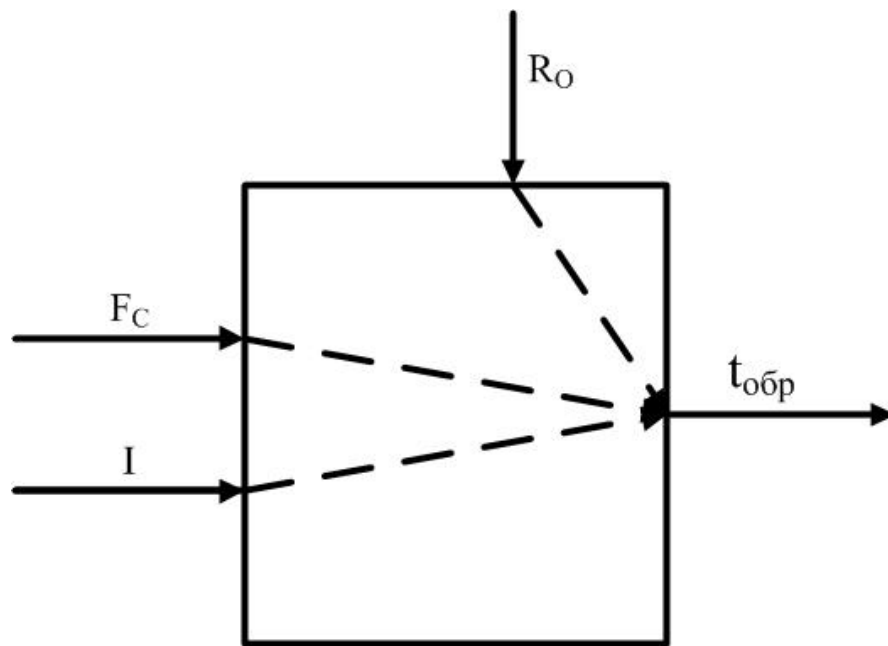


Рис. 7 Структурно-параметрична схема досліджуваних каналів регулювання в електрокальцинаторі

$F_c$  – вхідний параметр, це витрата сировини [кг/с]. Від цього параметру залежить швидкість подачі матеріалу, а відтак і продуктивність апарату (тим більша продуктивність, чим більша швидкість подачі матеріалу). Цей параметр є вимірювальним, оскільки його ми можемо застабілізувати.

$I$  – керування, це ток [А]. Від току залежить якість виробленої продукції, розмір, густина, однорідність матеріалу.

$R_o$  – збурення, це є опір матеріалу [Ом]. Цей параметр пов'язаний з характеристикою матеріалу. Також він є невимірювальним, тому постійно маємо матеріал брати на пробу. Опір необхідно зменшувати, оскільки він впливає на температуру обробки матеріалу, а відтак і на якість готової продукції.

В даній роботі було досліджено зміну температурного поля робочого простору електрокальцинатора в залежності від сили струму, що підводиться та швидкості завантаження / вивантаження матеріалу.

### 1.5 Постановка задачі керування

В даній роботі розробляємо таку систему керування, яка б виготовляла продукцію високої якості, з мінімальними витратами на виробництво. Для реалізації цієї мети необхідно створити високоточну математичну модель процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу. Оскільки процес має досить складну та нелінійну (динамічну) характеристику, то для розробки системи керування необхідно розробити спрощену модель процесу, яка зможе доволі точно відтворювати результати моделювання початкової (складної) моделі, але при цьому матимете значно менший час розрахунку.

Для створення ефективної системи керування необхідно на основі отриманої математичної моделі провести дослідження динаміки об'єкту. Проаналізувати існуючі системи керування та синтезувати таку систему керування, що забезпечує високу якість продукції та зменшення енерговитрат. Порівняти створену систему та провести аналіз з існуючими підходами до керування процесом прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу. Описати можливі ризики, що можуть виникати під час роботи з електрокальцинатором і алгоритм запобігання з даними чинниками.

## 2. РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СИРОВИНИ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ ШАХТНОГО ТИПУ

В даному розділі досліджується вплив технологічних змінних на процес прожарювання вуглецевої сировини в електричних печах шахтного типу. Оскільки виконання експериментів на реальному об'єкті є на даний момент неможливим, з'являється необхідність використання математичних моделей.

### 2.1 Аналіз існуючих математичних моделей

На даний момент існує велика кількість праць, присвячених питанням термічної обробки вуглецевої сировини в електричних печах шахтного типу. При цьому більшість робіт спрямована на дослідження властивостей сировини при прожарюванні (температура обробки 1200 – 1500 °С) і значно менша кількість на процес графітування. Так, в роботі [1] наведено детальний опис процесу прожарювання, а також дослідження питомого електричного опору коксу та антрациту від температури, тривалості прожарювання та швидкості нагріву в діапазоні температур 400 – 1300 °С.

Автори [8] наводять як дослідження теплових та електричних властивостей вуглецевих матеріалів так і кінетику та термодинаміку процесу графітування.

Досить важливим є дослідження [29] електричного контактного опору графіту з міддю та терморозширеним графітом, адже результати даного дослідження можна використати при числовому моделюванні графітування вуглецевих виробів для завдання умов на границі мідь – графіт чи графіт - графіт.

В праці [30] викладено результати експериментальних досліджень зміни складу летких речовин, що виділяються з антрациту при його термообробці в електрокальцинаторі. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, що відбуваються в результаті утворення летючих, з урахуванням підсосу повітря і реакцій взаємодії газоподібних речовин між собою, вуглецем і золою антрациту, а також з вогнетривкою футеровкою.

В даних роботах увага приділяється дослідженню властивостей вуглецевих матеріалів та процесів, що проходять при їх нагріванні, але не запропоновано модель самого процесу термообробки, яку можна було б використати як основу при моделюванні процесу графітування нафтового коксу в електричних печах шахтного типу.

Автори [9] провели порівняльний аналіз печей для реалізації першої стадії двостадійної обробки коксу, що включає нагрів коксу до температур 900 – 1200 °С задля видалення основної частини летючих продуктів та забезпечення стабільної якості коксу – та другу стадію – високотемпературну обробку коксу в печі з електротермічним киплячим шаром за температури 2000 – 2500 °С. Результати даного дослідження недоцільно використовувати, оскільки розглядається одно стадійний процес обробки в електрокальцинаторі.

Дослідженню другої стадії двостадійної обробки коксу присвячено роботу [10]. Автори досліджують особливості використання для реалізації даного процесу печі з електротермічним киплячим шаром. За їх свідченням використання даного типу печі дозволяє значно зменшити перепад температур по зоні прожарювання.

В праці [11] сформульовано основні вимоги до конструкції електрокальцинатора, призначеного для отримання графітованого наповнювача для електродних виробів. Проведено аналіз існуючих технічних рішень, запропонованих в конструкціях електрокальцинаторів та відзначено переваги та недоліки розглянутих конструкцій.

В даних дослідженнях також не описана математична модель графітування нафтового коксу, так як основна увага приділяється можливим конструкційним та технологічним рішенням проблем, що виникають при термообробці вуглецевої сировини.

Автори [12] пропонують математичну модель теплової роботи електрокальцинатора на основі складання та вирішення зональних рівнянь теплового балансу. Також в даній роботі наведені рівняння для визначення

електропровідності, ефективної теплопровідності матеріалу та коефіцієнта теплопередачі між поверхнею матеріалу та газовою фазою. Недоліком даної роботи є відсутність в ній самих рівнянь теплового балансу для електрокальцинатора та відсутність перевірки створеної моделі на адекватність.

В працях [5,13] розроблено фізичну та математичну моделі процесу графітування нафтового коксу в шахтній однофазній електропечі безперервної дії. Дана модель враховує досить значну кількість особливостей процесу, таких як той факт, що робочий простір печі є двофазним середовищем, нафтовий кокс є сипучим матеріалом, що зумовлює необхідність використання ефективних значень його фізичних властивостей, які залежать від температури та тиску. Також модель враховує вплив хімічних процесів, що протікають при нагріванні матеріалу. Оскільки дана модель досить повна та дозволяє теоретично дослідити процес – доцільно використовувати її як основу для створення моделі графітування нафтового коксу в електричних печах шахтного типу.

## **2.2 Процес прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу**

Оскільки було вирішено використовувати [5,13] в якості основи для створення моделі, то доцільним буде викласти основні положення даної моделі.

Фізична модель процесу графітування нафтового коксу в шахтній електропечі може бути сформульована таким чином. Конструктивно шахтна електропіч представляє собою сталеву обичайку (кожух) (рис. 1), яка всередині футерована вогнетривкими і теплоізоляційними матеріалами, у верхній та нижній торцевих частинах якої знаходяться графітові або вуглеграфітові електроди.

Шахтна піч оснащується системою водяного охолодження п'єдесталу нижнього електрода, розвантажувального стола та бічної поверхні кожуха, а також системою газовідводу. В нижній частині розміщується розвантажувальний стіл з системою дозування готового продукту. Нафтовий кокс, який є сипучим матеріалом, рухається вниз вздовж вертикальної осі печі у

порожнині, утвореній конструкційними елементами печі, а гази, які утворюються у процесі виділення залишкових летючих та часткового окислення коксу за рахунок підсмоктування повітря через систему розвантаження, навпаки, рухаються вгору.

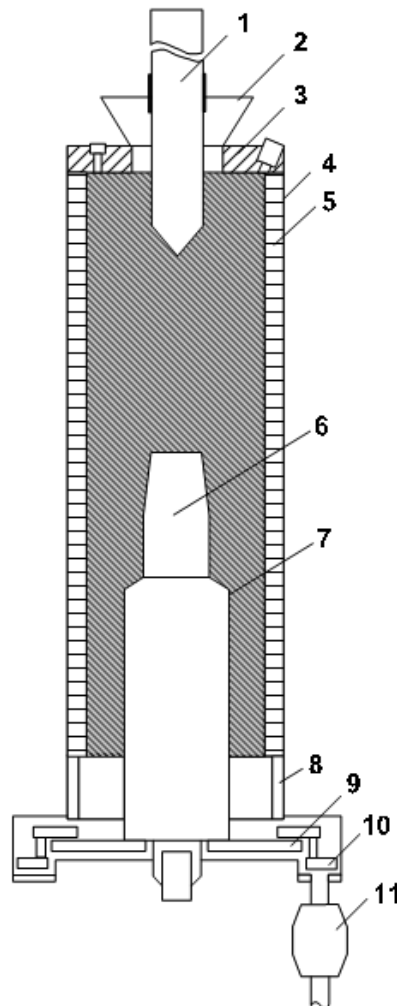


Рис.8 Схема промислового електрокальцинатора ИЕТ-10-УХЛ-4 для отримання термоантрациту: 1 - верхній графітований електрод; 2 - завантажувальна воронка; 3 - пробка; 4 - металевий кожух; 5 – футеровка; 6 - нижній графітований електрод; 7 - опора; 8 - обичайка; 9 - стіл; 10 - лопатки механізму розвантаження; 11 - дозатор ДТА-200

Тому робочий простір печі являє собою двофазне середовище. Електричний струм безпосередньо проходить через електропровідний кокс та спричинює його нагрівання за рахунок виділення джоулевої теплоти. Швидкість руху сипучого матеріалу є змінною величиною і визначається,

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	40
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		



дозою та частотою його вивантаження. Для забезпечення неперервності процесу на заміну вивантаженого готового продукту у нижній частині печі подається вихідний матеріал у верхню її частину через живильник. Внаслідок того, що нафтовий кокс є сипучим матеріалом, фізичні його властивості приймаються як ефективні значення, які залежать від температури і тиску. Процес графітування коксу супроводжується фізичними процесами, які пов'язані між собою: складний рух сипучого матеріалу, спричинений дією сил гравітації; рух газів у зворотному напрямку; протікання електричного струму по електропровідним елементам конструкції, включаючи кокс; складний теплообмін всередині печі і зовні з оточуючим середовищем. Електричне поле в печі вважається безвихровим, термоелектричні ефекти також не враховуються. Фізичні властивості усіх матеріалів печі приймаються ізотропними.

В процесі графітування коксу, як було вище відзначено, відбувається вихід залишкових летючих органічних компонентів та часткове окислення коксу аналогічно процесу прожарювання антрациту, що спричинює виділення теплоти за рахунок хімічних реакцій.

Електрокальцинатор ефективний агрегат для проведення високотемпературних процесів прожарювання вуглецевих матеріалів. Сутність цих процесів полягає в розвитку і формуванні кристалічної решітки графіту [3] при температурі 2000-2500 °С. В електрокальцинаторі процеси теплообміну і нагрівання матеріалу роблять основний вплив на інтенсивність і результат цього процесу [12].

Нагрівання в основному здійснюється за рахунок виділення теплоти в шарі матеріалу, що прожарюється при проходженні через нього електричного струму. Теплота також виділяється при горінні оброблюваного матеріалу і летючих речовин, що виділяються з нього [12].

Теплове поле у внутрішньому просторі електрокальцинатора розподілено вкрай нерівномірно. Встановлено, що концентрація силових ліній струму і найбільший розігрів (понад 2500 °С) проходить в зонах, розташованих в

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		41

міжелектродному просторі поблизу осьової лінії, а матеріал біля стінок електрокальцинатора нагрівається (від 800 до 1200 °С) за рахунок потоку тепла, що йде від центральних найбільш нагрітих електричним струмом зон. Цієї температури недостатньо для отримання продукту необхідної якості, що призводить до зниження техніко-економічних показників через необхідність відділення непрожареної частини продукту для повторної обробки [12]. Прямий контроль температури всередині електрокальцинатора практично здійснити важко, тому для дослідження обчислювального експериментом і оптимізацією процесу доцільно створити його математичну модель. Для цього використаний зональний метод розрахунку теплообміну та наступна схема розбиття ЕК на зони (рис. 9) [12].

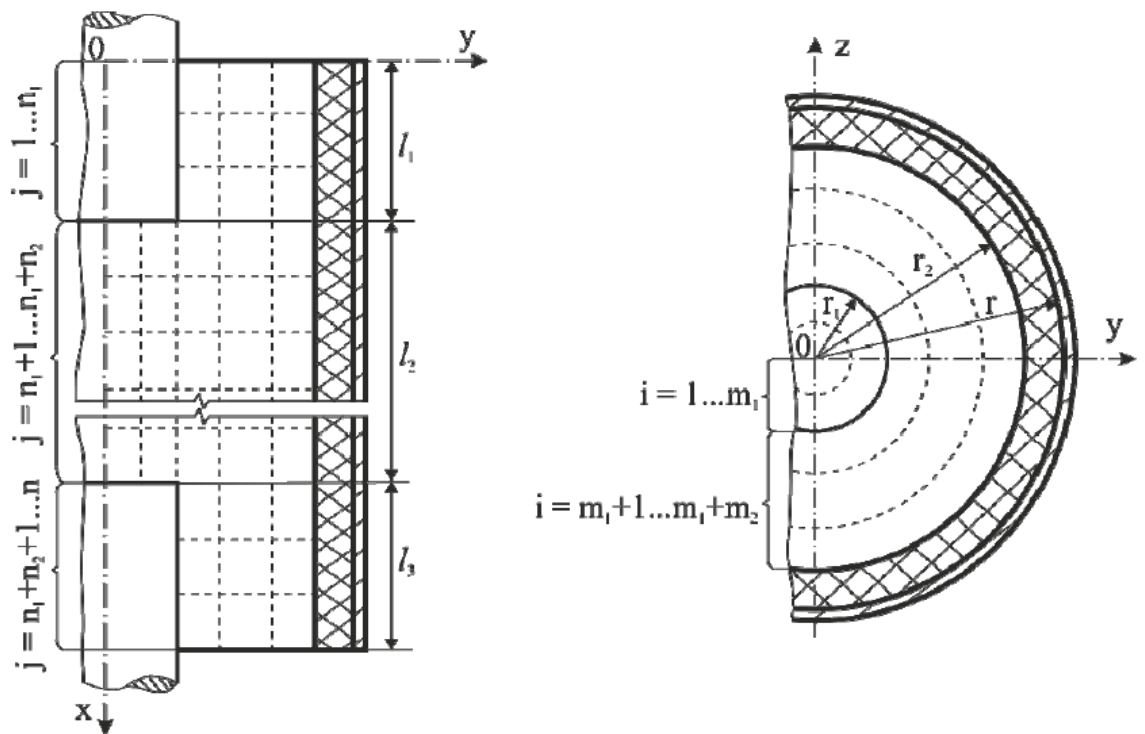


Рис. 9 Схема розбивки електрокальцинатора на зони [12]

З огляду на повну симетрію щодо осі  $x$ , з метою розрахунку теплообміну електрокальцинатора застосована його двовірна модель. По осі  $x$  кількість зон дорівнює  $n$ , а по осі  $y$  -  $m$ , де  $n = n1 + n2 + n3$ , а  $m = m1 + m2$ . Загальна кількість зон становить  $l = m \cdot n$  [12].

Розрахунок поля температур всередині ЕК заснований на складанні і вирішенні системи зональних рівнянь теплового балансу. Кількість рівнянь в системі дорівнює кількості зон  $l$ . Залежність теплофізичних характеристик від температури, що використовуються в математичній моделі, здійснюється за рахунок застосування відомої ітераційної процедури. Вона виконується в наступній послідовності:

- 1 - задаються перші наближення зональних температур;
- 2 - складаються зональні рівняння теплового балансу;
- 3 - рішенням системи рівнянь розраховуються більш точні значення зональних температур;
- 4 - використовуючи уточнене значення цих температур, виконуються з другого пункту наступні кроки ітераційної процедури;
- 5 - розрахунок завершується при отриманні точного рішення моделі, коли різниця значень зональних температур двох послідовних ітераційних кроків не перевищують необхідної точності рішення [12].

Аналіз літературних джерел показав, що в даний час відсутній повний обсяг необхідних відомостей про процес прожарювання для точного його опису за допомогою математичної моделі. Це пов'язано з тим, що в електрокальцинаторі взаємопов'язані різні види теплопередачі в сукупності з локальними джерелами виділення тепла, з рухом матеріалу і виділенням летючих. З метою створення комплексної моделі необхідно виявити процеси, які надають визначальний вплив на кінцевий результат [12].

Для математичного опису процесу, крім базових властивостей матеріалів, необхідно кількісно описати комплексний процес зміни властивостей матеріалу з урахуванням впливу зміни електричного, теплового, газодинамічного полів електрокальцинатора, а також кінетики хімічних реакцій (горіння вуглецю в шарі, виділення і горіння летких і т.д.) [12].

Основними фізико-хімічними властивостями матеріалу, що змінюються в процесі термообробки, які використовуються при оптимізації процесу

прожарювання, є питома електропровідність, теплопровідність, щільність, теплоємність, ступінь графітації і зміст летючих речовин [12].

Електропровідність матеріалу є однією з найважливіших характеристик процесу прожарювання і якості продукції. В роботі [20] на основі експериментальних даних отримано інтегральне кінетичне рівняння для визначення питомої електропровідності  $\sigma$  і встановлено, що зростання кристалів є фактором, що визначає підвищення питомої електропровідності:

$$\sigma = b \left( \int_{\tau_0}^{\tau} \exp\left(-\frac{E}{RT(\tau)}\right) d\tau \right)^n, \quad (1)$$

де  $\tau$  - тривалість ізотермічної витримки, хв.;  $E$  - уявна енергія активації, кДж / моль;  $R$  - універсальна газова стала, кДж / (моль · К);  $T$  - абсолютна температура, К;  $b$  і  $n$  – постійні [12].

Відомо, що істотні коливання значень питомої електропровідності виникають в силу неоднорідності фізико-хімічних властивостей вихідного матеріалу, а саме через широкого інтервалу гранулометричного складу. Крім того, гранулометричний склад впливає на контакт між окремими зернами матеріалу, при якому електрична і теплова енергія переходять від одного зерна до іншого. У зв'язку з цим в місці контакту виникає перегрів матеріалу, який впливає на питому електропровідність в цілому. Використовуючи дослідження, проведені в роботі [21], можна вивести залежність питомої електропровідності від падіння напруги в точці контакту, температурою перегріву і теплопровідністю матеріалу:

$$\sigma = 8 \frac{\theta \lambda}{U^2}, \quad (2)$$

де  $\theta$  - температура перегріву контактної місця, К;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м · К),  $U$  - контактна напруга, В [12].

Іншим найважливішим фактором, поряд з питомою електропровідністю, яка визначає роботу електрокальцинатора, є ефективна теплопровідність, яка визначається з урахуванням газової фази, розташованої між шматками

матеріалу, і може бути виражена рівнянням [20]:

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon_v}{\frac{1}{\frac{\lambda_0}{\lambda_r} - \sqrt[3]{\varepsilon_v}}} \right), \quad (3)$$

де  $\lambda_0$  і  $\lambda_r$  - теплопровідність матеріалу і середня теплопровідність газів в просторі між шматками відповідно, Вт / (м · К);  $\varepsilon_v$  - пористість шару.

Оскільки електрокальцинатор це агрегат, в якому протікає складний теплообмін, то, крім теплопровідності, необхідно враховувати і конвекцію і випромінювання. коефіцієнт теплопередачі  $\alpha$  між поверхнею матеріалу і газовою фазою визначають за рівнянням:

$$\lambda = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{d_{cp}}, \quad (4)$$

де  $Nu$  - наведене число Нусельта,  $d_{cp}$  - середній еквівалентний діаметр шматків матеріалу, м [12].

Вплив радіаційного теплообміну можна визначити за рівнянням М.М. Гасика для системи вільно насипаних тіл:

$$\lambda_{рад} = 1,71 \cdot 10^{-9} T^3, \quad (5)$$

при  $\varepsilon = 0,4$  і інтегральної ступеня чорноти,  $\varepsilon_{рад} = 0,8-0,9$ , де  $T$  - абсолютна локальна температура матеріалу, К [12].

Наведені залежності дозволяють створити математичну модель електрокальцинатора, за допомогою якої можна з достатньою точністю отримати значний обсяг інформації, який буде в подальшому використаний для визначення оптимальних режимних параметрів і конструкцій агрегату, а також практичного застосування отриманих результатів [12].

## 2.3 Математична модель процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу

У відповідності до сформульованої фізичної моделі, автори [5,13] пропонують записувати процес графітування нафтового коксу в шахтній електропечі у вигляді зв'язаної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних з використанням моделей Ейлера та теплоелектричного стану, які включають в себе рівняння нерозривності, збереження руху, енергії і квазістаціонарної електропровідності:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i V_i) = 0, i = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i V_i)}{\partial \tau} + (\varepsilon_i \rho_i V_i \cdot \nabla) V_i = -\varepsilon_i \rho_i \nabla p + \beta_{ij} (V_i - V_j) - \delta_i [\nabla p_i - G(\varepsilon_i) \nabla \varepsilon_i] + \varepsilon_i \rho_i g, i, j = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i h_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i h_i V_i) = -p \left\{ \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i V_i) \right\} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \lambda_{ef,i} \nabla T_i) + \alpha_{V,ef} (T_i - T_j) + \\ \frac{\delta_i}{\gamma(p_i, T_i)} |\nabla u_i|^2 + q_{V,chem}, i, j = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_i(T) \nabla T] + \frac{1}{\gamma_i(T)} |\nabla u_i|^2, i = \overline{3,M}; \\ \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\gamma_i(p, T)} \nabla u \right] = 0, i = \overline{1,M}, \end{array} \right. \quad (6)$$

де індекси  $i = \overline{1,2}$  – відносяться до двофазного середовища, тобто індекс 1 або g означає газову фазу, а індекс 2 або s – сипучий матеріал – нафтовий кокс; індекси  $i = \overline{3,M}$  – відносяться до твердих елементів конструкції печі;  $M$  – загальна кількість елементів печі, включаючи двофазне середовище;  $\varepsilon_i, i = \overline{1,2}$  – об'ємна частка  $i$ -ї фази;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с;  $V_i, i = \overline{1,2}$  – вектор швидкості газової та сипучої фази, відповідно, м/с;  $p$  – тиск, Па;  $\beta_{ij} = -\beta_{ji}, i, j = \overline{1,2}$  – об'ємний коефіцієнт передачі імпульсу між газом і твердими частинками сипучого шару і навпаки, кг/(м<sup>3</sup> с);  $G(s)$  – коефіцієнт взаємодії частинка-частинка [14, 15], Па;  $h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$  – масова ентальпія в двофазному середовищі, Дж/кг;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кгК);  $T_{ref}$  – температура відліку, К;  $p_s = p_2$  – тиск у сипучій фазі, Па;  $\lambda_g = f_g(T_g, \varepsilon_g)$ ,

$\lambda_s = f_s(T_s, p_s, \varepsilon_s)$  – ефективна теплопровідність газової і твердої фази з врахуванням радіаційного теплообміну, Вт/(мК);  $\alpha_{V,ef}$  – об’ємний міжфазний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>3</sup>К);  $q_{V,chem}$  – об’ємна теплота від хімічних реакцій, Вт/м<sup>3</sup>;  $\delta_i = \begin{cases} 0, i=1; \\ 1, i=2; \end{cases}$   $H = \int_0^T c_p(T) \rho(T) dT$  – об’ємна ентальпія в твердих елементах конструкції печі, Дж/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – питомий електричний опір, Омм;  $u$  – електричний потенціал, В.

Для визначення об’ємного міжфазного коефіцієнта теплопередачі можна використати співвідношення виду:

$$\alpha_{V,ef} = \frac{6\varepsilon_s}{d_{ef,s}} \alpha_{ef,g-s}, \quad (7)$$

де  $\alpha_{ef,g-s} = f(Re_s, Pr)$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі газ–тверді частинки сипучого шару, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $d_{ef,s}$  – ефективний діаметр частинок, м;  $Re_s = \frac{\varepsilon \rho_g |V_g - V_s| d_{ef,s}}{\mu_g}$  – критерій Рейнольдса;  $\mu_g$  – коефіцієнт динамічної в’язкості газової фази, Па с;  $Pr = \frac{c_{p,g} \mu_g}{\lambda_g}$  – число Прандтля газової фази;  $\mu_g$  – теплопровідність газової фази, Вт/(м К).

Об’ємний коефіцієнт передачі моменту між газом і твердими частинками сипучого шару визначаються, наприклад, за [16]:

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_g \varepsilon_g |V_g - V_s|}{d_{ef,s}} \varepsilon_g^{-2.65}, \quad (8)$$

де  $C_D = \frac{24}{\varepsilon_g Re_s} [1 + 0,15(\varepsilon_g Re_s)^{0.687}]$  – функція гідравлічного опору сипучого шару.

Гradient тиску  $\nabla p_s$  сипучого шару має місце тоді, коли упаковка твердих частинок у шарі не досягла свого максимального значення. В цьому випадку тиск в шарі сипучого матеріалу може бути визначений як [15]:

$$p_s = 2\rho_s(1 - e_{ss})\varepsilon_s^2 g_{ss} T_s, \quad (9)$$

де  $e_{ss}$  – коефіцієнт, який враховує відновлення пористості сипучого шару після зіткнень частинок;

$g_{ss} = \left[ 1 - \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}}} \right]$  – функція безрозмірної відстані між частинками сипучого шару [17].

Початкові умови при  $\tau = 0$ :

$$\begin{cases} T(X) = T_0; \\ u(X) = 0; \\ V_i(X) = 0, i = \overline{1,2}; \\ p = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Граничні умови при  $\tau > 0$ :

на торцях верхнього (11) і нижнього електродів (12)

$$j_n = n \cdot (-\chi(T)\nabla u), \quad (11)$$

$$u = 0, \quad (12)$$

де  $n$  – вектор зовнішньої нормалі до граничної поверхні;  $\chi(T) = [\gamma(T)]^{-1}$  – електропровідність матеріалу, (Ом м)<sup>-1</sup>;

на границях контакту твердих електропровідних елементів конструкції печі для рівнянь енергії розглядаються умови (13) і електропровідності – (14)

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{n \cdot q\} = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \{u\} = 0; \\ \{n \cdot j\} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

де  $\{T\} = T^+ - T^-$ ;  $\{n \cdot q\} = n^+ \cdot q^+ - n^- \cdot q^-$ ;  $q = -\lambda(T)\nabla T$  – вектор густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\{u\} = u^+ - u^-$ ;  $\{n \cdot j\} = n^+ \cdot j^+ - n^- \cdot j^-$ ;  $j = -\chi(T)\nabla u$  – вектор густини електричного струму, А/м<sup>2</sup>; для неелектропровідних елементів система рівнянь (14) не враховується; на границях внутрішньої порожнини шахтної печі (контакт двофазне середовище – тверде тіло)



$$\begin{cases} V_g = 0; \\ \tau_t = n \cdot (\mu_s V_s), \end{cases} \quad (15)$$

де  $\tau_t$  – тангенціальне напруження, Па;  $\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}$  – динамічна в'язкість сипучого матеріалу [15, 18], Па · с;  $\mu_{s,col}, \mu_{s,kin}, \mu_{s,fr}$  – в'язкість, що пов'язана із зіткненням частинок, кінетичною енергією частинок і з тертям між частинками, відповідно, Па · с; на зовнішніх границях печі задаються умови конвективного теплообміну, які описують повітряне і водяне охолодження (наприклад, п'єдесталу нижнього електрода)

$$n \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = \alpha_{ef}(T)(T - T_d), \quad (16)$$

де  $\alpha_{ef}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К);  $T_d$  – температура довкілля, К; на верхньому торці печі в місці завантаження коксу розглядаються умови (17), а в зоні відсмоктування газової фази – (18)

$$\begin{cases} T_s = T_{s,in}; \\ G_s = G_{s,in}, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} n \cdot \nabla T = 0; \\ p = 0, \end{cases} \quad (18)$$

де  $G_{s,in}$  – витрати сипучого матеріалу на вході у піч, кг/с.

Система рівнянь, наведених вище складає математичну модель графітації нафтового коксу, що дає змогу дослідити вплив технологічних параметрів процесу на температурні поля в робочому просторі електрокальцинатора.

Для проведення подальших досліджень модель графітації нафтового коксу в електричних печах шахтного типу була реалізована в програмному засобі *ANSYS*.

## 2.4 Дослідження властивостей об'єкта керування на основі математичної моделі

В рамках даного дослідження весь робочий простір електрокальцинатора було умовно поділено на три зони (рис. 10). В даній праці було досліджено зміну температурного поля робочого простору електрокальцинатора в

залежності від сили струму, що підводиться та швидкості завантаження / вивантаження матеріалу.

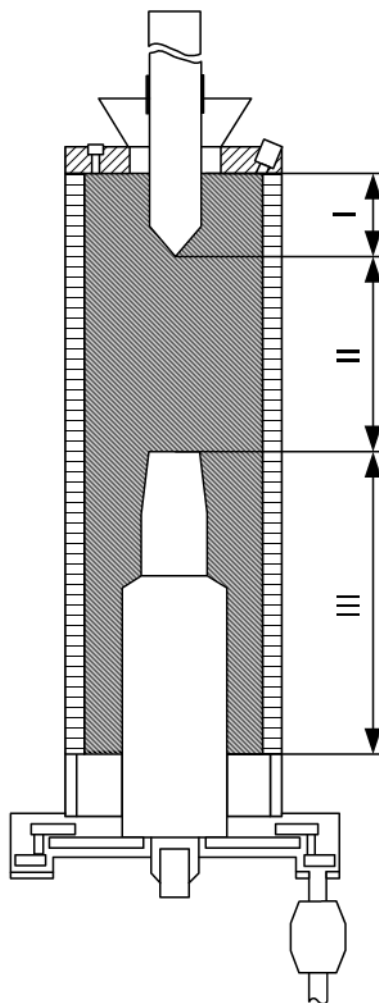


Рис.10. Розташування температурних зон у промисловому електрокальцинаторі ИЕТ-10-УХЛ-4 для отримання термоантрациту: I – зона нагріву; II – зона графітування; III – зона охолодження

В першій зоні за рахунок теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу та частинами електрокальцинатору відбувається нагрів тільки що завантаженого матеріалу. Густина струму, що проходить по матеріалу в даній зоні не значна, тому й нагрів за рахунок джоулевого тепла є досить не значним.

Друга зона є найважливішою, адже безпосередньо в ній відбувається графітування вуглецевого матеріалу за рахунок нагріву до температур 2200 °C джоулевим теплом, що виділяється при проходженні струму по матеріалу. Температурне поле в даній зоні визначає якісні показники обробленого

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	50
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

матеріалу, тому в першу чергу в дослідженні буде розглядатись саме ця зона. Для забезпечення заданої якості матеріалу необхідно, щоб в II зоні встановилась температура 2200 °С [5] при цьому значною проблемою є зниження перепаду температур в даній зоні [26, 27, 28]. Тому доцільно в дослідженнях розглядати як самі температурні поля даної зони так і мінімальні та максимальні температури в ній.

В третій зоні відбувається охолодження обробленого матеріалу та нижнього електроду за рахунок протікання води по об'єму опори.

Для дослідження залежності температурного поля від технологічних параметрів необхідно спочатку провести моделювання процесу за номінальних значень даних параметрів. Номінальне значення струму за свідченнями авторів [4] складає 15 кА, максимальне значення – 20 кА. Номінальну швидкість завантаження матеріалу вираховуємо з середньої продуктивності електрокальцинаторів:

$$V = \frac{G}{\rho S} \quad (19)$$

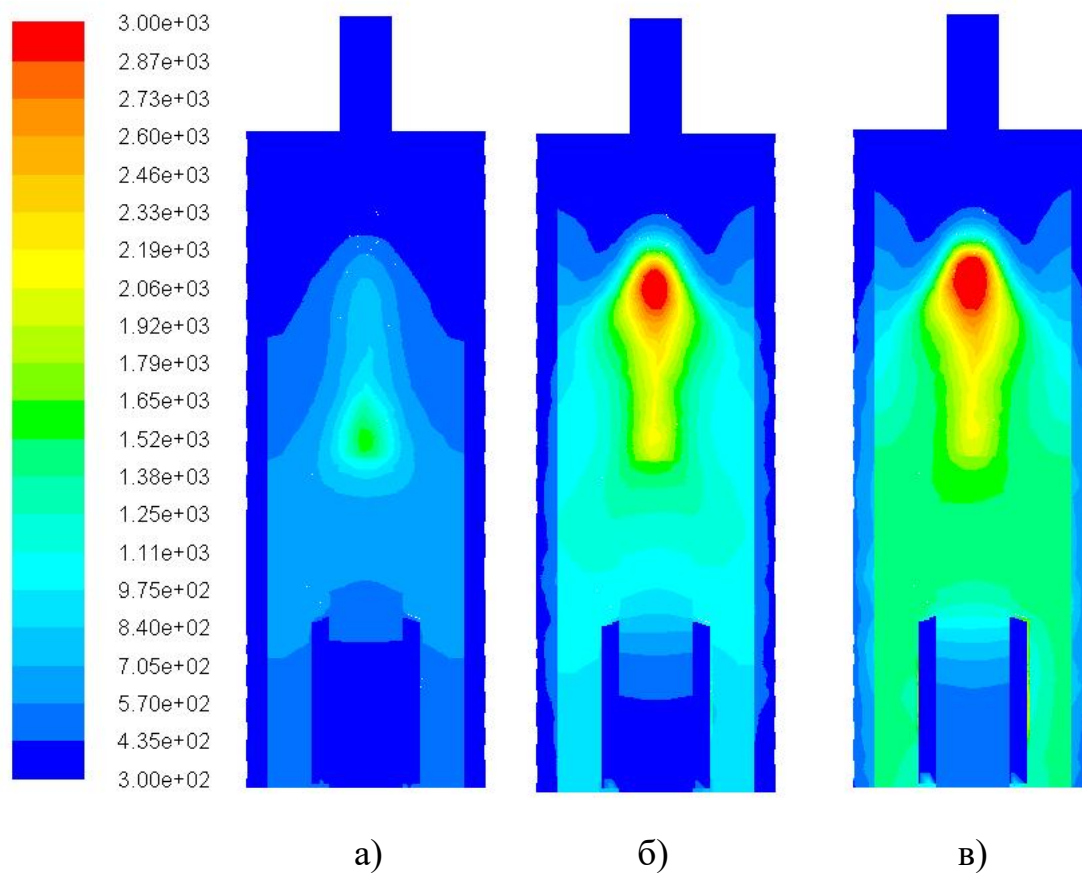
де  $G$  – продуктивність, кг / с;  $\rho$  – насипна густина матеріалу, кг / м<sup>3</sup>;  $S$  – площа поперечного перерізу завантажувальної воронки, м<sup>2</sup>.

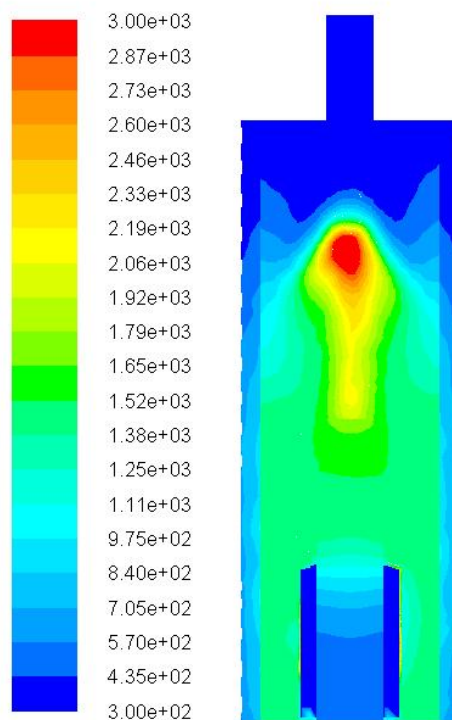
Продуктивність електрокальцинаторів складає 1,5 т / год [1, 3], насипна густина нафтового коксу 1550 кг/м<sup>3</sup> [1], площа поперечного перерізу завантажувальної воронки електрокальцинатору ИЕТ-10-УХЛ-4 – 0,38 м<sup>2</sup>. Тоді номінальна швидкість завантаження матеріалу – 0,0007 м/с.

За початкову температуру в усьому об'ємі апарата приймається температура 300 К, тобто розглядається кампанія термічної обробки вуглецевої сировини з розігрівом об'єму апарату починаючи від температури навколишнього середовища (режим розгону). Тривалість розгону згідно з [6] складає 40 год.

### 2.4.1. Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,0007 м/с та струму 15 кА

За номінальних значень технологічних параметрів на 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 400 – 840 К в II зоні. При цьому існує незначна зона біля нижнього електрода, де температура матеріалу досягає 1570 К (рис.11. (а)).





г)

Рис.11. Температурне поле ((а) наприкінці 10 год. обробки, (б) - наприкінці наприкінці 20 год. обробки, (в) - наприкінці 30 год. обробки, (г) - наприкінці 40 год. обробки)

Згідно [1, 3, 5] в об'ємі матеріалу, що знаходиться безпосередньо між електродами вже починається виділення летючих, адже температура тут перевищує 400 °С, тоді як в шарах матеріалу, що знаходиться ближче до стінок електрокальцинатору таких перетворень ще не відбувається.

Швидкість нагріву варіюється від 0,15 °С/ хв. для шарів біля стінки апарату (рис.12. (а)) до 2,15 °С / хв. для центральних шарів (рис.12. (б)), що призводить до значного перепаду температур по радіусу апарату (1257 °С наприкінці 10 години обробки (рис.12. (в))). При цьому, при досягненні 1000 К починається різке зростання температури, що пояснюється значним зменшенням електричного опору за такої температури [6].

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 603 – 2190 К в II зоні(рис.11. (б)). В зоні біля верхнього електроду досягається найбільша температура за весь час обробки 3168 К (рис.12. (б)). З одного боку, це

забезпечує дуже низький питомий електричний опір матеріалу, але автори [31] вказують на те, що за температур 2600 – 2800 °С збільшується вміст штучного графіту у вихідному матеріалу, що негативно впливає на пластичні властивості електродної маси.

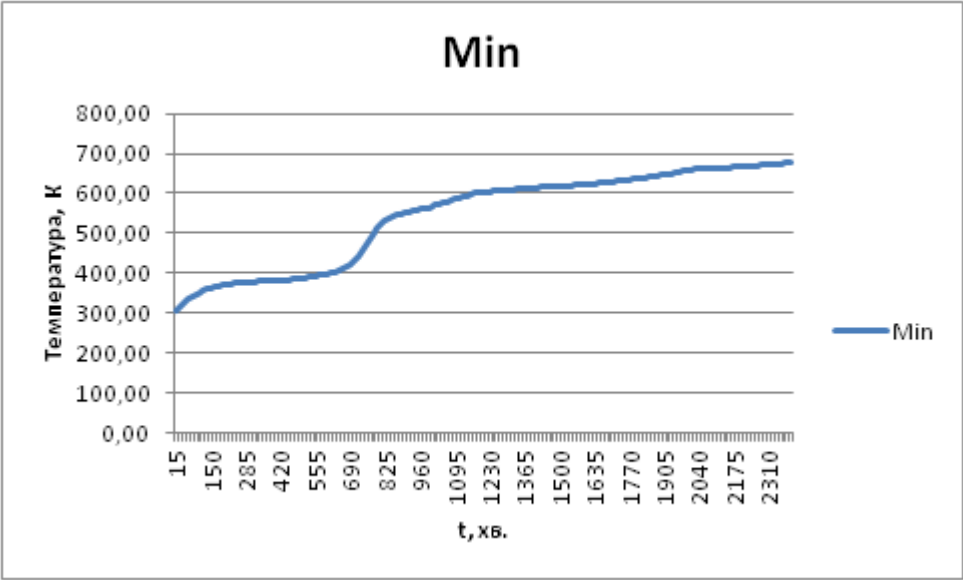
По досягненню 3168 К максимальна температура починає поступово спадати, що пояснюється теплообміном з менш нагрітими шарами вуглецевого матеріалу. В результаті різкого збільшення максимальної температури наприкінці 10 годин обробки далі, на початку наступних 10 годин, спостерігається й швидкий ріст мінімальної температури від 400 до 543 К (рис.12. (а)).

Не зважаючи на те, що в порівнянні з попереднім проміжком часу середня швидкість росту максимальної температури на даному проміжку часу зменшується (1,22 °С / хв.), а середня швидкість росту мінімальної температури збільшується 0,17 °С / хв. перепад температури все ж зростає і наприкінці 20 години обробки складає 2561 °С (рис.3.3. (в)).

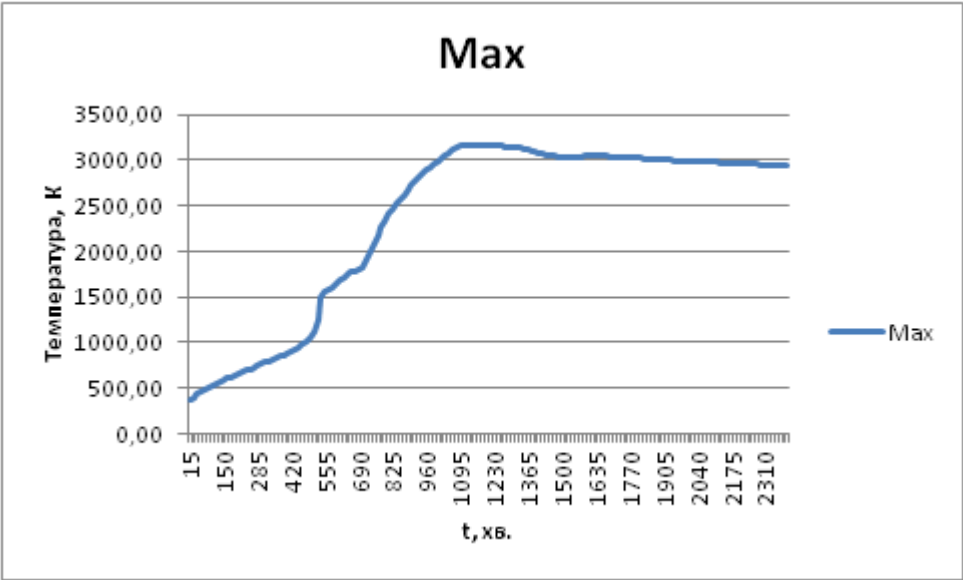
Наступні два проміжки часу (тридцять та сорокова година обробки) супроводжуються процесами усталення температурних полів (рис.11. (в), (г) ). Швидкість росту мінімальної температури наприкінці 30 години – 0,018 °С / хв., наприкінці 40 години – 0,017 °С / хв. (рис.12. (а)). Максимальна температура продовжує спадати за рахунок теплообміну з менш нагрітими шарами матеріалу, швидкість спаду складає 0,16 °С / хв. наприкінці 30 години, 0,24 °С / хв. – наприкінці 40 години (рис.12. (б)). За рахунок усталення температурних полів перепад температур зменшується до 2257 °С.

В результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура в центральних шарах в середньому складає 2060 К (1787 °С), тоді як в шарах, що знаходяться біля стінок апарату середня температура 1250 К (977 °С). Таким чином для середніх температур перепад складає 810 °С. За таких перепадів температур умова усередненості властивостей обробленого матеріалу не виконується, до того ж навіть в більш

нагрітих шарах температура в середньому не досягає 2200 °С, а отже можна говорити про те, що обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення. Тоді виникає необхідність в дослідженні динаміки процесу за інших технологічних режимів, тобто іншої сили струму та швидкості завантаження матеріалу.



а)



б)



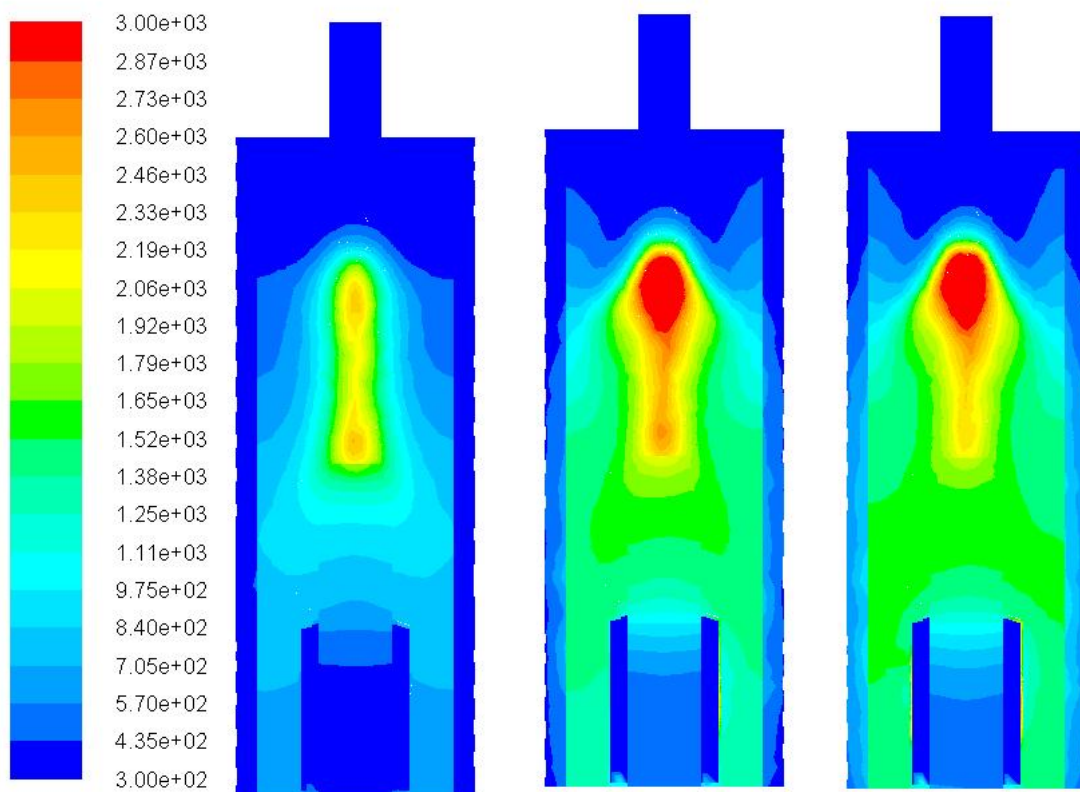
в)

Рис.12. Температури в II зоні електрокальцинатора ((а) – мінімальна температура, (б) – максимальна температура, (в) – перепад температур)

#### 2.4.2. Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,0007 м/с та струму 20 кА

При моделюванні процесу графітування нафтового коксу з максимальним значенням струму, що підводиться на 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 490 – 1850 К в II зоні. Температура в зонах з найбільшою густиною струму (біля верхнього та нижнього електродів) досягає 2514 К (рис.13. (а)).

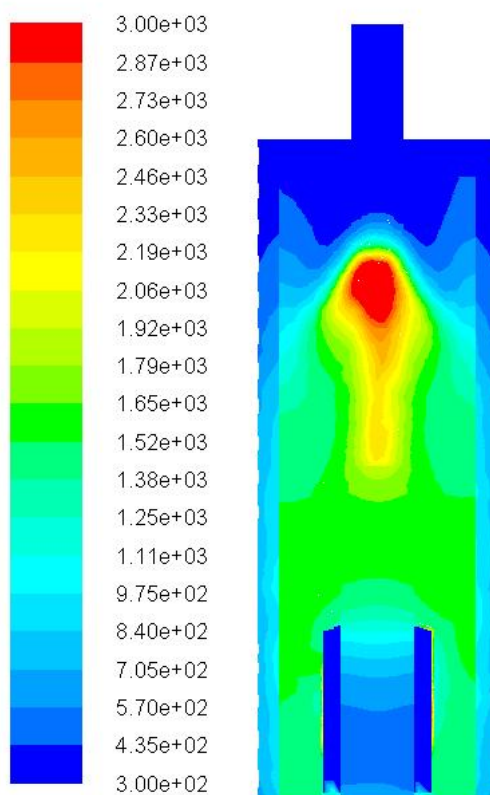




а)

б)

в)



г)

Рис.13. Температурне поле ((а) наприкінці 10 год. обробки, (б) - наприкінці наприкінці 20 год. обробки, (в) - наприкінці 30 год. обробки, (г) - наприкінці 40 год. обробки)

Швидкість нагріву варіюється від  $0,30\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  для шарів біля стінки апарату (рис.14. (а)) до  $3,57\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  для центральних шарів (рис.14. (б)), що призводить до значного перепаду температур по радіусу апарату ( $2024\text{ }^{\circ}\text{C}$  наприкінці 10 години обробки (рис.14. (в))). Таким чином збільшення струму, що підводиться спричинило збільшення швидкості нагріву по всьому апарату, але якщо для шарів біля стінки швидкість збільшилась на  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ , то для центральних шарів це значення склало  $1,42\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ . В результаті перепад температур збільшився на  $767\text{ }^{\circ}\text{C}$  в порівнянні з перепадом за номінальних значень параметрів. За таких температур в матеріалі, що знаходиться між верхнім та нижнім електродом активно протікають процеси виділення летючих [5] та усадки матеріалу [1], тоді як в шарах біля стінки апарату фізико-хімічні перетворення матеріалу практично не відбуваються.

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до  $657\text{--}2650\text{ K}$  в II зоні(рис.13. (б)). В зоні біля верхнього електроду досягається найбільша температура за весь час обробки  $3631\text{ K}$  (рис.14. (б)). В порівнянні з процесом за номінальних параметрів збільшується об'єм матеріалу з температурою вище  $2600\text{--}2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що негативно впливає на пластичні властивості електродної маси [31]. До того ж такі значні температури біля верхнього електроду спричиняють появу таких термічних напружень, що можуть призвести до виходу електроду з ладу.

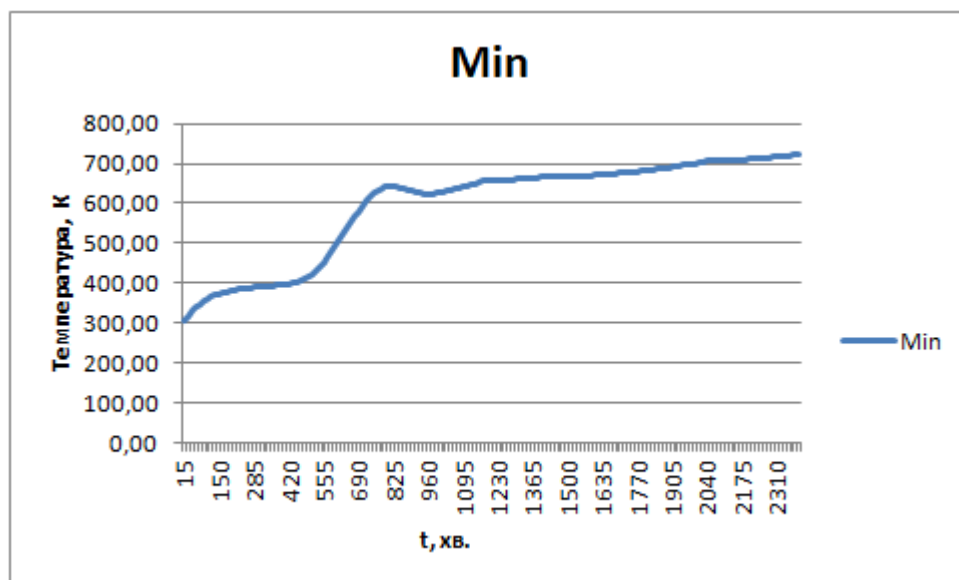
По досягненню  $3631\text{ K}$  максимальна температура починає поступово спадати, що пояснюється теплообміном з менш нагрітими шарами вуглецевого матеріалу. В результаті різкого збільшення максимальної температури наприкінці 10 годин обробки далі, на початку наступних 10 годин, спостерігається швидкий ріст мінімальної температури від  $490$  до  $641\text{ K}$  (рис.14. (а)), після чого мінімальна температура доволі лінійно зростає за рахунок

теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу. Не зважаючи на те, що в порівнянні з попереднім проміжком часу середня швидкість росту максимальної температури на даному проміжку часу зменшується ( $1,69\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ ), а середня швидкість росту мінімальної температури зменшується до  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  перепад температури зростає і наприкінці 20 години обробки складає  $2959\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис.14. (в)), що на  $398\text{ }^{\circ}\text{C}$  більше ніж перепад за аналогічний проміжок часу у випадку моделювання з номінальними значеннями технологічних параметрів.

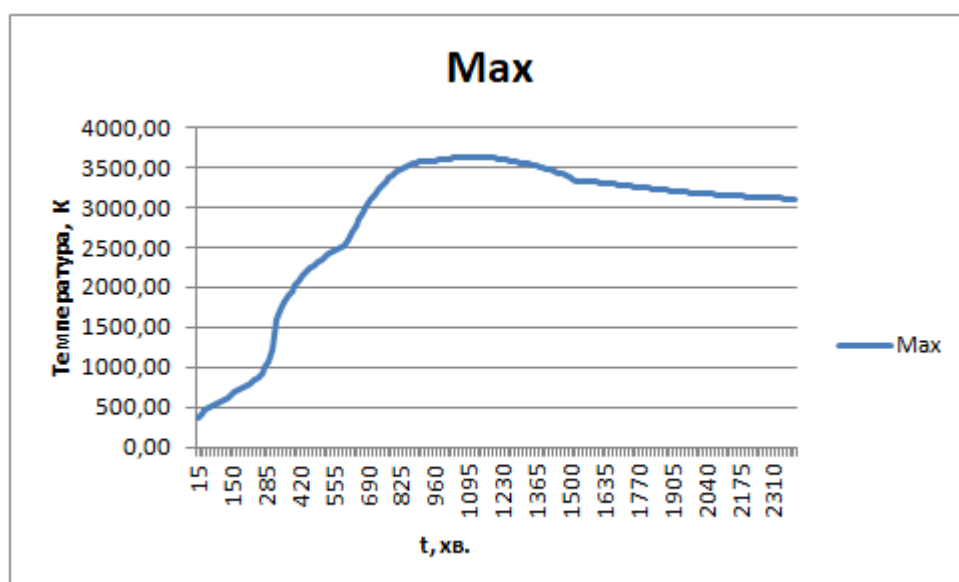
Тридцята та сорокова година обробки матеріалу супроводжуються процесами усталення температурних полів (рис.13. (в), (г)). Швидкість росту мінімальної температури наприкінці 30 години –  $0,082\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ , наприкінці 40 години –  $0,066\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  (рис.14. (а)). Максимальна температура продовжує спадати за рахунок теплообміну з менш нагрітими шарами матеріалу, швидкість спаду складає  $1,28\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  наприкінці 30 години,  $1,54\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  – наприкінці 40 години (рис.14. (б)). За рахунок усталення температурних полів перепад температур зменшується до  $2378\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис.14. (в)).

В результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура в центральних шарах в середньому складає  $2360\text{ K}$  ( $2087\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тоді як в шарах, що знаходяться біля стінок апарату середня температура  $1480\text{ K}$  ( $1207\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Таким чином для середніх температур перепад складає  $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що на  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  більше середнього перепаду за номінальних значень технологічних параметрів. За таких перепадів температур умова усередненості властивостей обробленого матеріалу знову таки не виконується, так само як і середня температура не досягає  $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а отже можна говорити про те, що обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення. Виконання поставлених умов можливе за умови вибору не тільки струму, що подається, а й оптимальної швидкості завантаження матеріалу, а отже з'являється й необхідність дослідження впливу швидкості завантаження на температурні поля електрокальцинатора.

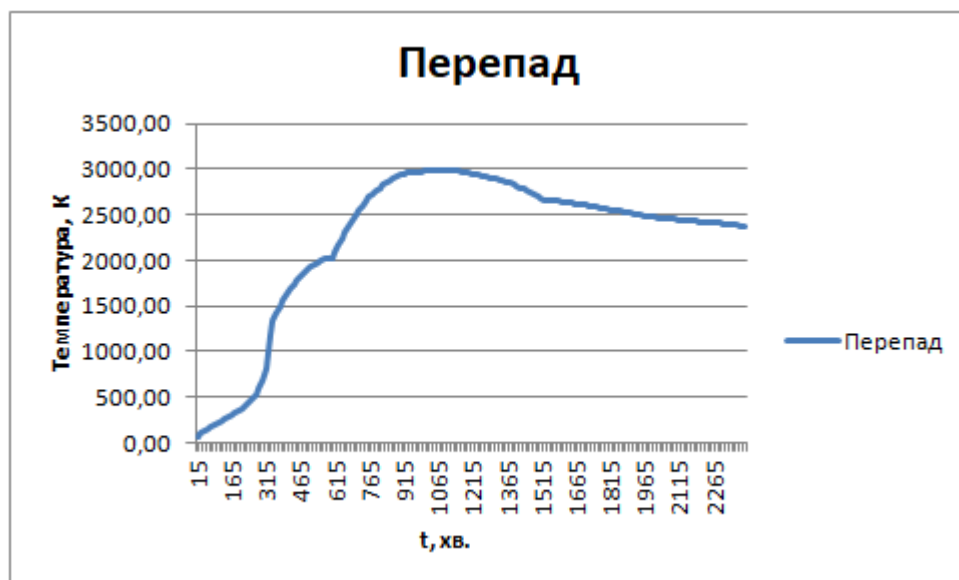
					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		59



а)



б)

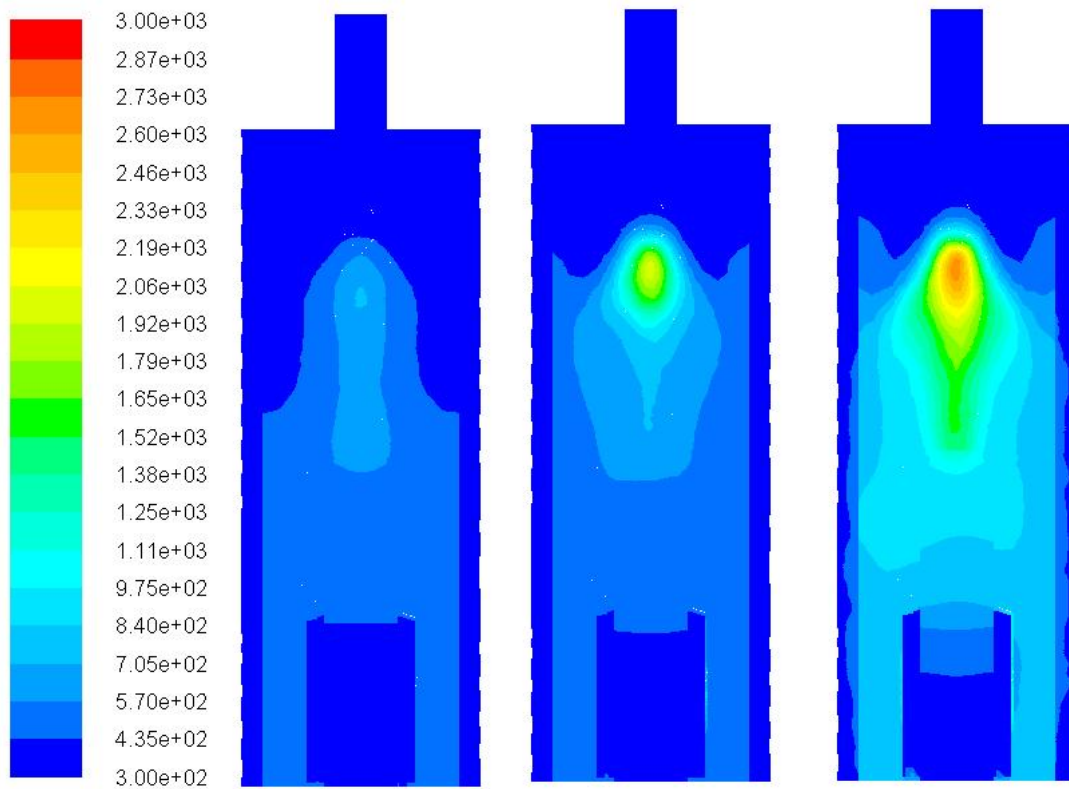


в)

Рис.14. Температури в II зоні електрокальцинатора ((а) – мінімальна температура, (б) – максимальна температура, (в) – перепад температур)

#### 2.4.3. Температурне поле електрокальцинатора за швидкості завантаження 0,001 м/с та струму 15 кА

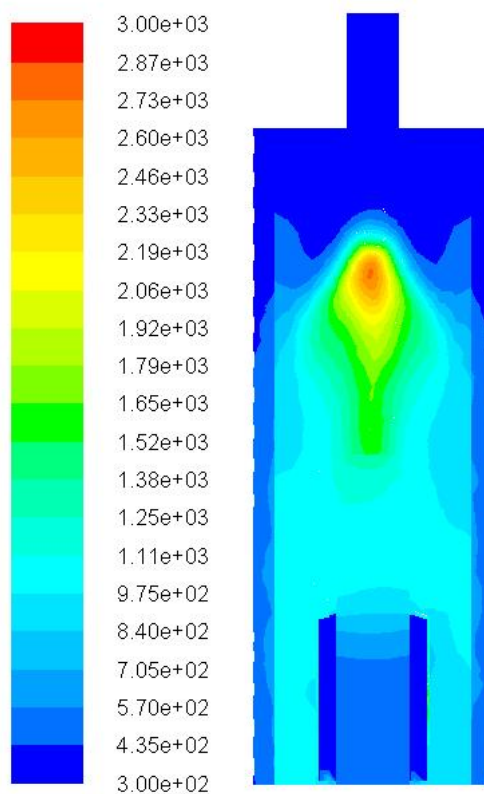
При збільшеній швидкості завантаження (0,001 м/с) на 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 380 – 630 К в II зоні. Максимальна температура досягається біля верхнього електроду та становить 733 К (рис.15. (а)).



а)

б)

в)



г)

Рис.15. Температурне поле ((а) наприкінці 10 год. обробки, (б) - наприкінці наприкінці 20 год. обробки, (в) - наприкінці 30 год. обробки, (г) - наприкінці 40 год. обробки)

Швидкість нагріву варіюється від  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  для шарів біля стінки апарату (рис.16. (а)) до  $0,62\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$  для центральних шарів (рис.16. (б)), що значно нижче ніж швидкість нагріву на даному інтервалі часу за номінальних значень ( $0,15 - 2,15\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ ). Таким чином збільшення швидкості завантаження спричинило зменшення швидкості нагріву по всьому апарату, при цьому найбільший вплив на температурні поля спостерігається в центральних шарах матеріалу, для яких спад швидкості нагріву склав  $1,53\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ . В результаті такого повільного нагріву перепад температур на кінець 10 години обробки склав 361 К (рис.16. (в)), що майже на 1000 К менше ніж перепад при номінальних значеннях параметрів.

За наступні 10 год. процесу температура матеріалу зростає до 436– 2024 К в II зоні (рис.15. (б)). Різке зростання максимальної температури спричинене зниженням електричного опору матеріалу, що досяг 1000 К (рис.16. (б)). На відміну від попередніх досліджень максимальна температура зростає протягом всього інтервалу часу.

На 1000 хв. обробки разом з різким зростанням максимальної температури спостерігається значне збільшення швидкості зростання мінімальної температури (рис.16. (а)), після чого мінімальна температура доволі лінійно зростає за рахунок теплообміну з більш нагрітими шарами матеріалу.

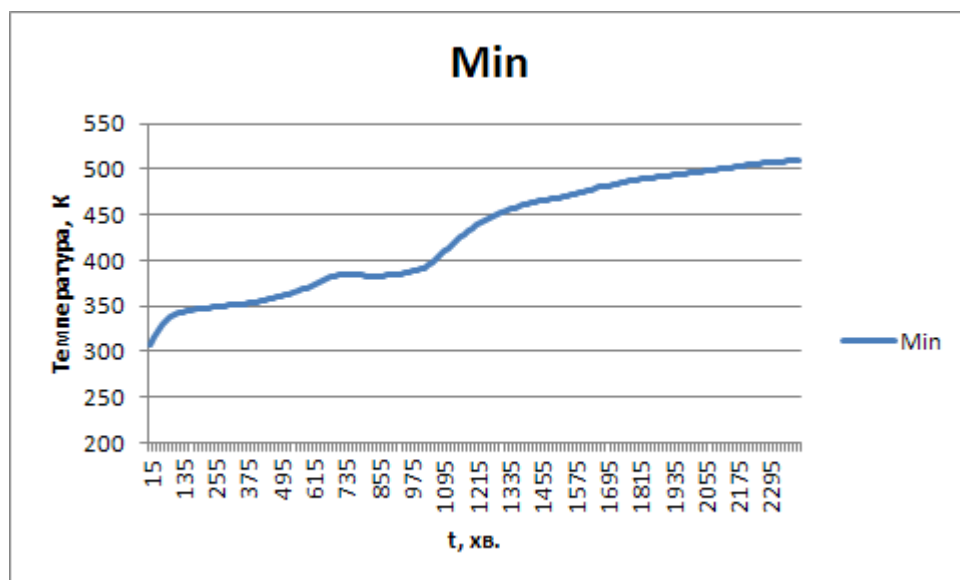
Швидкість росту максимальної температури на даному проміжку часу значно збільшується в порівнянні з попереднім проміжком часу ( $2,13\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ ), а середня швидкість росту мінімальної температури зменшується до  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$ . За рахунок цього перепад температури зростає і наприкінці 20 години обробки складає  $1587\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис.16. (в)), що на  $974\text{ }^{\circ}\text{C}$  менше аніж перепад за аналогічний проміжок часу у випадку моделювання з номінальними значеннями технологічних параметрів. Варто зазначити, що хоча й перепад температури

наприкінці 20 години зменшився в порівнянні з аналогічним інтервалом за номінальних значень технологічних параметрів, але максимальна температура продовжує зростати, що в подальшому призведе й до росту перепаду температур.

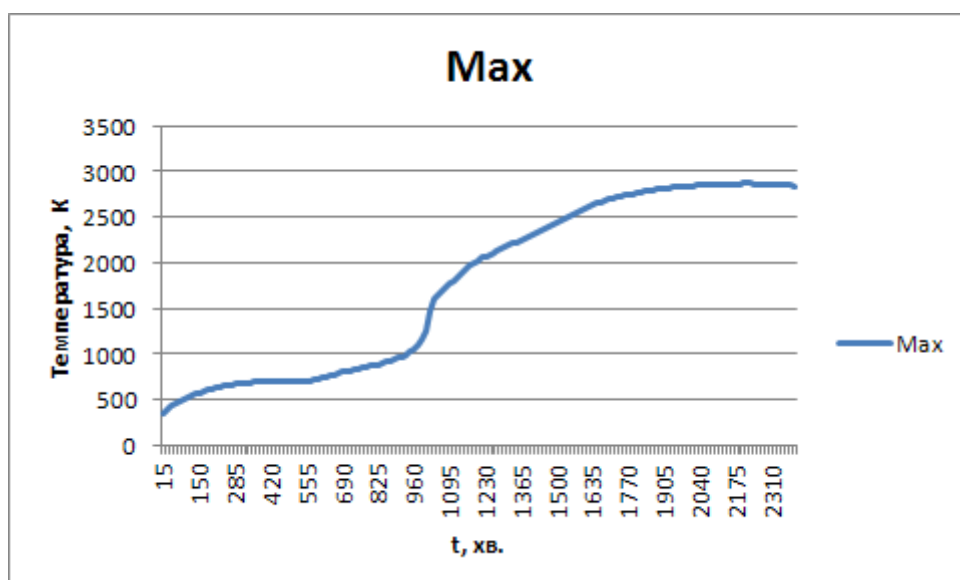
Тридцята та сорокова година обробки матеріалу супроводжуються процесам виходу максимальної температури на усталений рівень (рис.15. (в), (г) ). Швидкість росту мінімальної температури наприкінці 30 години – 0,082 °C/ хв., наприкінці 40 години – 0,034 °C / хв. (рис.16. (а)). Максимальна температура збільшується і виходить на усталений рівень, швидкість нагріву складає 1,18 °C / хв. наприкінці 30 години, 0,12 °C / хв. – наприкінці 40 години (рис.16. (б)). За рахунок росту максимальної температури до позначки 2841 К перепад температур збільшується до 2332 °C (рис.16. (в)), що на 75 °C більше в порівнянні з результатами моделювання за номінальних температур.

В результаті моделювання 40 год. процесу термообробки вуглецевої сировини температура в центральних шарах в середньому складає 1710 К (1437 °C ), тоді як в шарах, що знаходяться біля стінок апарату середня температура 860 К (587 °C). Таким чином для середніх температур перепад складає 850 °C, що на 40 °C більше середнього перепаду за номінальних значень технологічних параметрів. Бачимо, що зі збільшенням швидкості завантаження спостерігається зниження температури по всьому робочому об'єму апарату, що негативно впливає на якість матеріалу на виході. За таких перепадів температур умова усередненості властивостей обробленого матеріалу знову таки не виконується, так само як і середня температура не досягає 2200 °C, а отже робимо висновок, що обраний технологічний режим не є оптимальним для даного процесу та апаратного забезпечення. До того ж збільшення швидкості завантаження означає зменшення часу термообробки матеріалу, що також може негативно вплинути на якісні показники обробленого матеріалу [1,5-6].





a)



б)



в)

Рис.16. Температури в II зоні електрокальцинатора ((а) – мінімальна температура, (б) – максимальна температура, (в) – перепад температур)

## 2.5 Ідентифікація об'єкту керування

Так як час розрахунку складної моделі досить значний, то задля створення ефективної системи керування процесом необхідно створити швидкодіючі моделі, що будуть характеризувати динаміку об'єкту і зможуть бути застосовані для синтезу системи керування. Для цього необхідно обрати контрольні точки та провести ідентифікацію їх динаміки в залежності від технологічних параметрів. Такі точки мають бути обрані в другій зоні, оскільки саме там відбувається нагрівання, основні фізико-хімічні перетворення та формуються основні властивості вуглецевого матеріалу. Виходячи з результатів досліджень для ідентифікації було обрано контрольні точки, зображені на рис.17

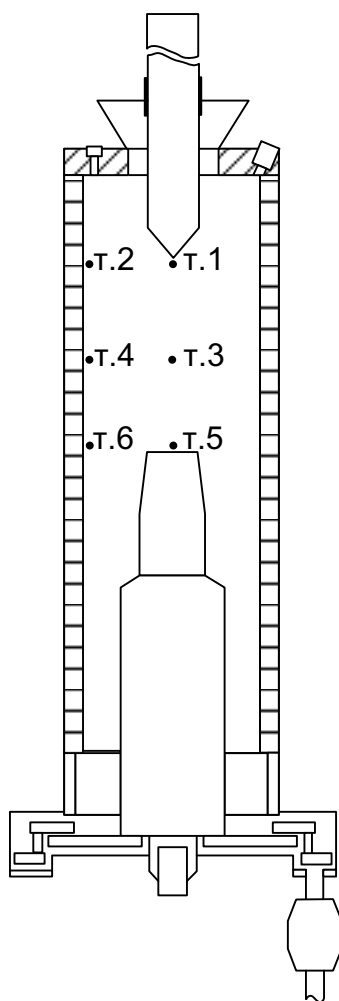


Рис.17. Розташування контрольних точок електрокальцинатора

Технологічними параметрами, що впливають на температури в контрольних точках є: швидкість подачі матеріалу ( $V_m$ ), струм, що підводиться ( $I$ ) та опір самого матеріалу ( $\rho_m$ ). Ідентифікація була проведена на основі даних дослідження, наведеного вище в середовищі *Matlab* за допомогою аперіодичних ланок I та II-го порядків з запізнюванням. Результати ідентифікації наведені на рис.18 – 23 та в табл. 1

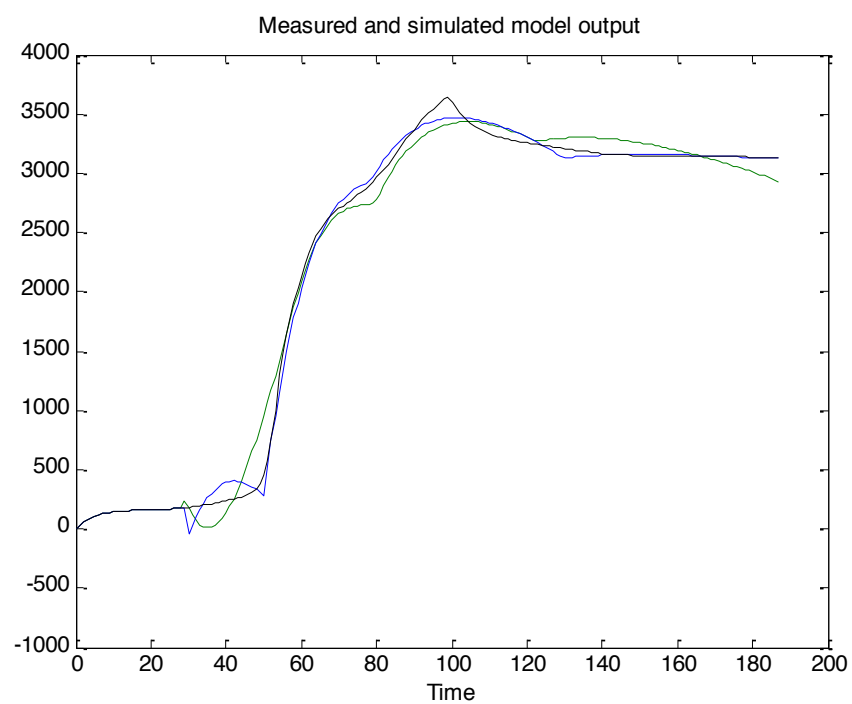


Рис.18. Значення  $T_1$  отримані з спрощеної моделі

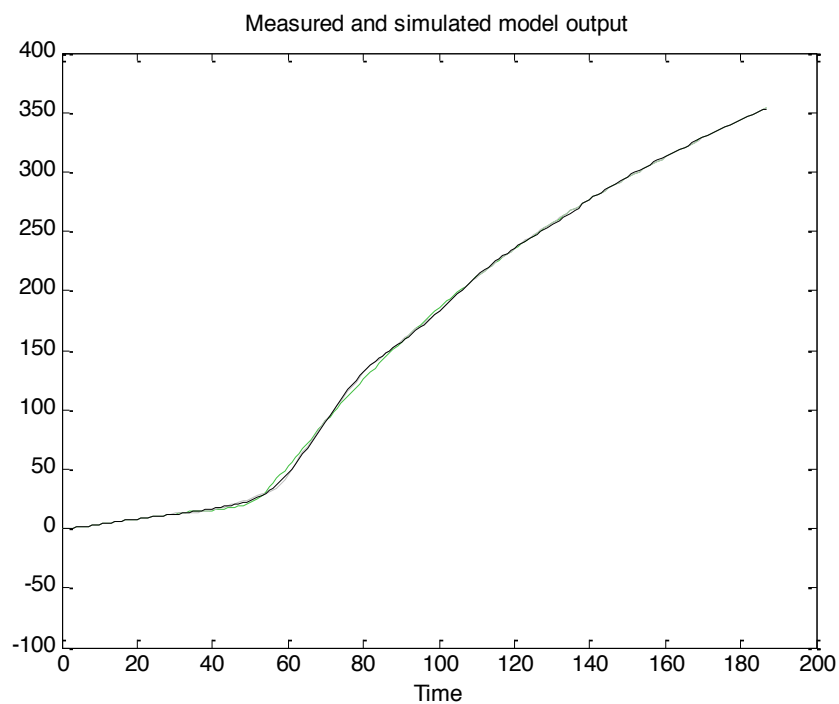


Рис.19. Значення  $T_2$  отримані з спрощеної моделі

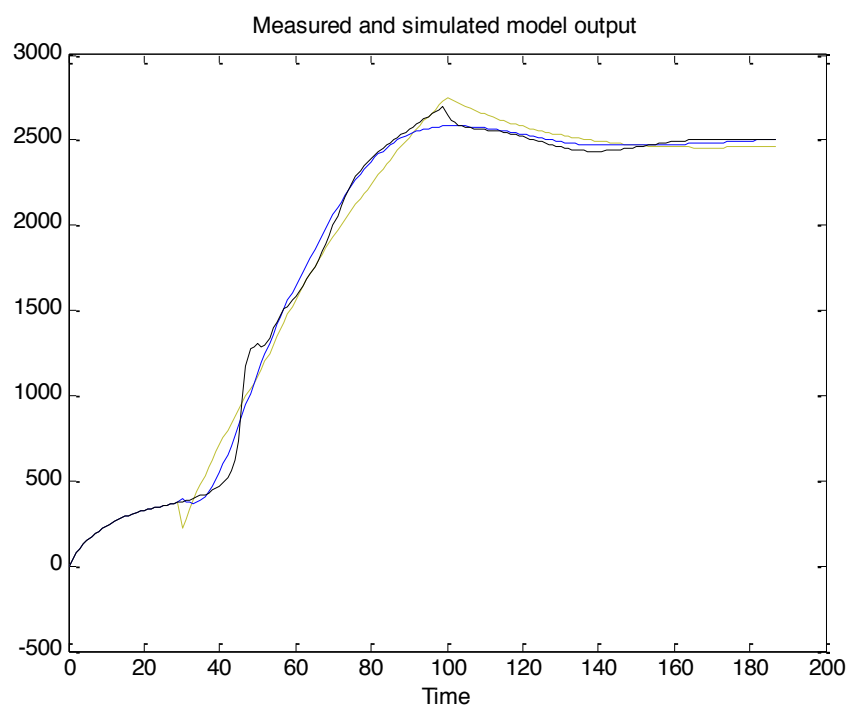


Рис. 20. Значення  $T_3$  отримані з спрощеної моделі

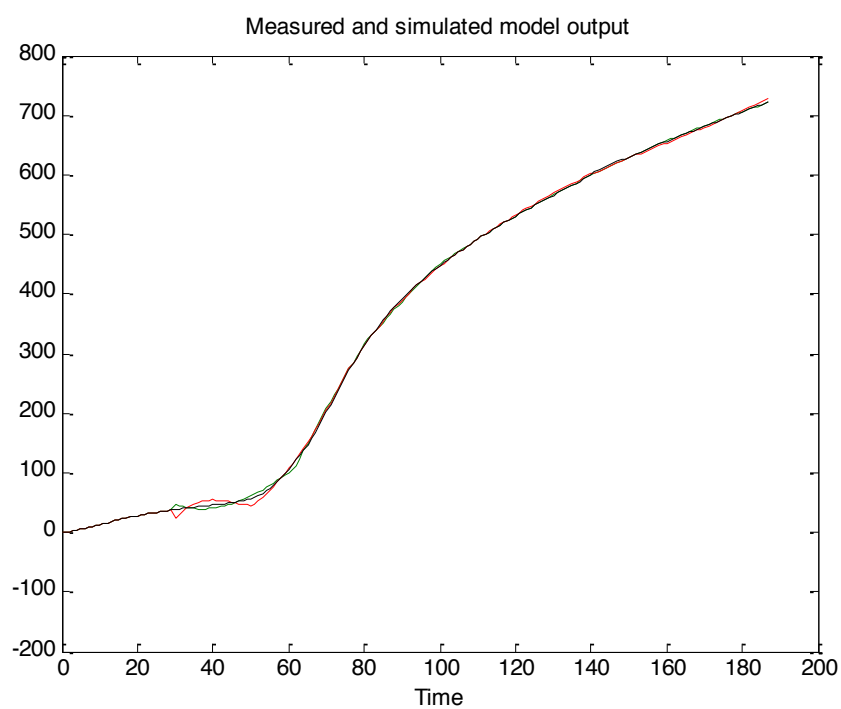


Рис.21. Значення  $T_4$  отримані з спрощеної моделі

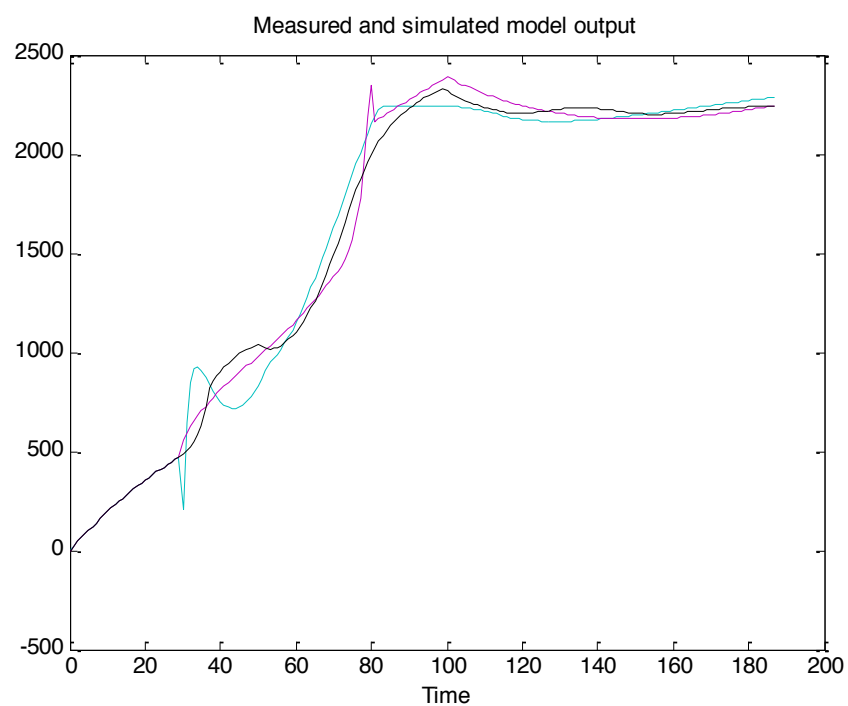


Рис.22. Значення  $T_5$  отримані з спрощеної моделі

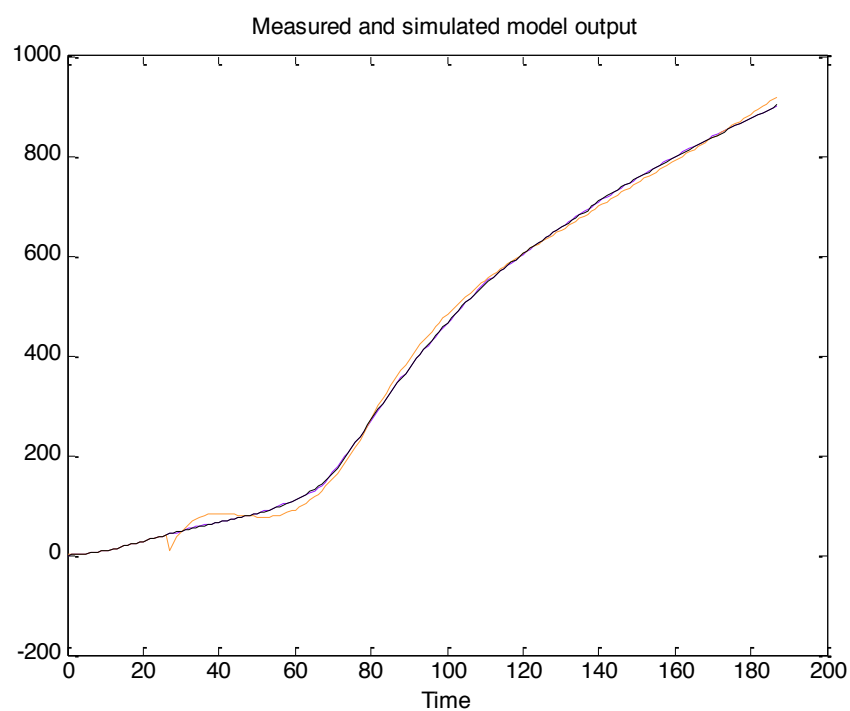


Рис.23. Значення  $T_6$  отримані з спрощеної моделі

Табл. 1. Передавальні функції, отримані в результаті ідентифікації

Точка	Канал	Передавальна функція I порядку	Точність %	Передавальна функція II порядку	Точність %
$T_1$	$V_m \rightarrow T_I$	$\frac{-153.2}{67.8s + 1} e^{-30s}$	94.32	$\frac{-153.2}{2321.8s^2 + 97.5s + 1}$	97.76
	$I \rightarrow T_I$	$\frac{3426}{67.8s + 1} e^{-12s}$		$\frac{3426}{1722.4s^2 + 96.3s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_I$	$\frac{-243.6}{67.8s + 1} e^{-9s}$		$\frac{-243.6}{1422.4s^2 + 98.1s + 1}$	
$T_2$	$V_m \rightarrow T_I$	$\frac{-427.1}{48.8s + 1} e^{-11s}$	99.13	$\frac{-427.1}{1628.2s^2 + 76.5s + 1}$	99.57
	$I \rightarrow T_I$	$\frac{1278}{48.8s + 1} e^{-18s}$		$\frac{1278}{1928.4s^2 + 75.7s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_I$	$\frac{-241.3}{48.8s + 1} e^{-8s}$		$\frac{-241.3}{1338.6s^2 + 78.2s + 1}$	
$T_3$	$V_m \rightarrow T_I$	$\frac{-157.2}{76.4s + 1} e^{-32s}$	93.87	$\frac{-157.2}{2411.2s^2 + 103.1s + 1}$	96.99
	$I \rightarrow T_I$	$\frac{2832}{76.4s + 1} e^{-9s}$		$\frac{2832}{1523.1s^2 + 105.2s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_I$	$\frac{-239.9}{76.4s + 1} e^{-9s}$		$\frac{-239.9}{1422.4s^2 + 102.8s + 1}$	
$T_4$	$V_m \rightarrow T_I$	$\frac{-441.6}{68.2s + 1} e^{-11s}$	99.01	$\frac{-441.6}{1622.2s^2 + 95.5s + 1}$	99.48
	$I \rightarrow T_I$	$\frac{1487.5}{68.2s + 1} e^{-18s}$		$\frac{1487.5}{1924.4s^2 + 95.7s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_I$	$\frac{-241.3}{68.2s + 1} e^{-8s}$		$\frac{-241.3}{1348.6s^2 + 98.2s + 1}$	
$T_5$	$V_m \rightarrow T_I$	$\frac{-167.2}{78.1s + 1} e^{-30s}$	95.22	$\frac{-167.2}{2325.1s^2 + 107.2s + 1}$	97.34
	$I \rightarrow T_I$	$\frac{2762.9}{78.1s + 1} e^{-12s}$		$\frac{2762.9}{1743.1s^2 + 108.1s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_I$	$\frac{-239.9}{78.1s + 1} e^{-11s}$		$\frac{-239.9}{1622.2s^2 + 106.9s + 1}$	

$T_6$	$V_m \rightarrow T_l$	$\frac{-481.6}{88.2s + 1} e^{-14s}$	99.10	$\frac{-481.6}{1711.8s^2 + 112.4s + 1}$	99.58
	$I \rightarrow T_l$	$\frac{1682.1}{88.2s + 1} e^{-21s}$		$\frac{1682.1}{1967.4s^2 + 1012.7s + 1}$	
	$\rho_m \rightarrow T_l$	$\frac{-244.3}{88.2s + 1} e^{-9s}$		$\frac{-244.3}{1397.2s^2 + 112.2s + 1}$	

В даному розділі ми дослідили 3 контури керування температурою в апараті в різних точках за швидкістю, силою струму та опором. З даного дослідження можна зробити висновок, що точність перехідних характеристик краща у передавальних функціях 2-го порядку. Тому саме їх будемо розглядати в наступному дослідженні, а саме синтезі системи керування.



### 3. РОЗДІЛ. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОЖАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СИРОВИНИ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ ШАХТНОГО ТИПУ

#### 3.1 Аналіз існуючих систем керування

Термічна обробка вуглецевої сировини – процес її нагріву до високих температур без доступу повітря в електричних печах за рахунок пропускання струму через матеріал. Метою даного процесу є стабілізація властивостей матеріалу, видалення вологи, летючих речовин, збільшення його густини, електропровідності. [1]

Найчастіше показником якості проходження обробки є електропровідність матеріалу, що в свою чергу залежить від кінцевої температури та часу термообробки, тому всі системи керування цим процесом намагаються забезпечити максимальну електропровідність матеріалу після обробки при якомога менших значеннях витрати електроенергії та зносу апаратури. Недоліком цього процесу є нерівномірний розподіл густини струму по об'єму апарату, що призводить до нерівномірного нагріву матеріалу і як наслідок анізотропії його властивостей, зокрема й електропровідності.

В роботі [1] описано технологію керування електрокальцинатором, що зводиться до завантаження, розвантаження матеріалу та підтримання теплового режиму регулюванням кількості електроенергії, що підводиться до печі. Завантаження й розвантаження матеріалу здійснюють періодично по 10-20 кг, або ж постійно. Тепловий режим регулюють по показам амперметра, або ж лічильника електроенергії. За умови періодичного завантаження розвантаження здійснюють при максимальних показках амперметра, що вказує на зниження електроопору матеріалу. Такий метод керування не враховує розподіл властивостей матеріалу по об'єму апарату, що може призвести до зменшення якості продукції.

В роботі [32] пропонують вимірювати спад напруги в зоні, що знаходиться біля нижнього електроду, знаючи значення вторинного струму

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		73

вираховувати опір в цій частині та використовувати отримане значення в якості поради мастера-технолога для керування швидкістю розвантаження матеріалу чи струмовим навантаженням. В роботі вказано, що дотримання електроопору шару в межах 0,21...0,25 мОм забезпечує вихід термоантрациту з питомим електроопором, що не перевищує 1000 мкОм·м. Даний метод керування передбачує введення в середину апарату датчиків, для чого необхідно буде порушити цілісність футеровки. Це призведе до зменшення міцності футеровки і прискорить її вихід з ладу. Враховуючи те, що періодичний вихід з ладу футеровки є однією з найголовніших проблем в процесі, навмисне порушення її цілісності є недопустимим.

В патенті [33] запропоновано керувати процесом за допомогою зміни вторинної напруги та припинення обробки при досягненні матеріалом питомого електроопору в 750 – 850 мкОм·м. Для компенсації реактивної потужності автори пропонують використовувати конденсаторні батареї, а для вимірювання електроопору встановити пробовідбірник для відбору проб матеріалу. Також запропоновано ряд засобів для попередження виникнення аварійних ситуацій, вказано максимально допустиму питому витрату електроенергії (900 – 1100 кВт·ч/т) та той факт, що збільшення вмісту штучного графіту в подальшому негативно впливає на пластичні властивості електродної маси. Враховуючи, що вміст графіту визначається кінцевою температурою та часом обробки, даний факт можна використати при створенні системи керування для визначення оптимального температурного режиму.

Система керування електрокальцинатором [34] включає систему подачі повітря для спалювання летючих та часткового спалювання матеріалу. Також пропонується розділити весь електрокальцинатор на зони високої та низької напруги за допомогою введення дроселів, підключених до електромережі, по висоті апарату. Протікання в апараті процесів горіння з однієї сторони зменшує затрати електроенергії на підігрів матеріалу та з іншої сторони має негативний вплив на футеровку.

В роботі [35] запропоновано керувати завантаженням розвантаженням та витратами електроенергії за регламентом, та корегувати регламент у випадку, коли кількість термоантрациту з густиною, більшою  $1,2 \text{ г/см}^3$  перевищує допустиму норму. На думку авторів дотримання густини термоантрациту на такому рівні забезпечить необхідну якість продукту.

Автори робіт [34,35] пропонують керувати процесом за допомогою експериментально визначених властивостей відібраних проб термоантрациту, що унеможливило створення системи керування в реальному часі та зменшить якість продукції. Також використання властивостей відібраних проб для визначення регламенту подачі електроенергії спричинює необхідність виведення залежностей регламенту від властивостей для кожного типу матеріалу (антрацит, нафтовий кокс т.д.), а в даних дослідженнях відсутній алгоритм побудови таких залежностей.

В праці [36] розглядається система керування температурної обробки вуглецевої сировини в барабанних печах, за якої регулювання процесу зводиться до підтримки заданої температури, оптимальної довжини зони розжарювання і її положення в печі шляхом зміни кількості палива, кисню повітря і розрідження в печі. Описано, що при зміні одного з регульованих параметрів необхідно вжити заходів до відповідних змін і інших параметрів. Якість обробленого вуглецевого матеріалу визначається аналізами проб, що відбираються після холодильника. Оброблений вуглецевий матеріал контролюють на вміст сірки, золи, летючих речовин і вологи, дійсну густину. Очевидним недоліком запропонованої системи в контексті використання для створення системи керування термічної обробкою вуглецевої сировини в електрокальцинаторі є принципова відмінність печей, в яких оброблюється матеріал. В той час, як основною проблемою в барабанних печах є підтримання довжини зони розжарювання і її положення в електричних печах шахтного типу основною проблемою є зменшення градієнту температур в зоні

безпосередньої обробки матеріалу, саме тому й системи керування даними апаратами направлені на вирішення принципово різних задач.

Автори [37] розглянули проблему автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора в реальному масштабі часу при керуванні нагрівальними об'єктами. Таке налаштування пропонується здійснювати за допомогою нейромережевого оптимізатора, що включає дві нейронних мережі, що на основі даних про вхідні, вихідні сигнали об'єкту та сигналу завдання в даний момент визначають коефіцієнти КР, КІ для процесів нагріву або охолодження печі відповідно. В роботі наведено структуру пропонованого оптимізатора та показана можливість застосування подібного оптимізатора до об'єктів управління з різними постійними часу.

Основним недоліком запропонованої системи керування в контексті використання для створення системи керування термічної обробкою вуглецевої сировини в електрокальцинаторі є використання SISO (simple input, simple output) моделі об'єкту в той час, як система керування електрокальцинатором має враховувати розподіл температур в робочому об'ємі апарату (тобто модель має мати більше однієї вихідної змінної), а саме керування може здійснюватися за допомогою зміни як електричного режиму так і режиму завантаження/вивантаження матеріалу (тобто модель має мати як мінімум дві вхідні змінні). Також запропонована система керування складається з контуру регулювання за температурою в печі, тоді як в процесі високотемпературної (2000 – 2500 °С) обробки вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторі відсутня можливість безпосереднього вимірювання температури матеріалу в робочій зоні печі.

В роботі [38] проведено огляд установок індукційних тигельних печей з електропровідним тиглем, проведена ідентифікація індукційних тигельних печей з графітовим тиглем для плавки міді та сплавів як об'єктів управління та запропоновано принцип регулювання електричного і теплового режимів роботи печей з електропровідним тиглем потужністю до 100 - 150 кВт, що живляться

від транзисторних перетворювачів високої частоти. Згідно запропонованого принципу регулювання у пакеті MATLAB розроблена двохпозиційна система регулювання температури металу в печі. Результати моделювання отриманої системи успішно використані при створенні лабораторно-промислової установки для плавки міді, магнію і сплавів, що доводить принципову можливість використання запропонованого принципу регулювання на практиці.

Запропонований в роботі [38] принцип регулювання має ті ж самі недоліки в контексті використання для створення системи керування термічної обробкою вуглецевої сировини в електрокальцинаторі, що й система керування [37].

В праці [39] досліджено вплив обмеження струму нагрівачів на роботу регуляторів температури у високотемпературних вакуумних печах опору. В рамках дослідження розглянуто регулятори температури печі опору, забезпеченою різними системами обмеження струму. Описана функціональна схема розробленого регулятора температури з «поєднаним» каналом зворотного зв'язку. Проаналізовано вплив відсікання струму на якість перехідних процесів і швидкодію системи. Актуальність введення відсікання струму в систему керування пояснюється тим, що електричний опір нагрівача (в електрокальцинаторі нагрівачем є сам матеріал), при нагріванні і охолодженні значно змінюється і, отже, змінюється і потужність, що виділяється в нагрівачі. Це призводить до того, що регулятор в системі керування температурою печі виробляє сигнал, що неоднозначно визначає потужність в нагрівачі, а отже й якість керування значно зменшується. Введення відсікання струму в систему керування вирішує дану проблему.

Недоліком даної системи керування є той факт, що запропонована система керування складається з контуру регулювання за температурою в печі, тоді як в процесі високотемпературної (2000 – 2500 °C) обробки вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторі відсутня можливість безпосереднього вимірювання температури матеріалу в робочій зоні печі.

Робота [40] присвячена розробці системи автоматичного управління енергетичним режимом електродугових печей змінного струму. В ній обґрунтовано доцільність використання ефективного пошукового методу екстремального керування та реалізації на його основі системи автоматичного управління енергетичним режимом електродугових печей змінного струму. Вказано, що в умовах роботи печі, які динамічно змінюються з впливом стохастичних і важкопрогнозованих збурень найбільш доцільно застосовувати адаптивні пошукові системи для управління та оптимізації режиму енергоспоживання.

В цій дипломній роботі пропонується здійснювати вибір оптимального режиму (по потужності) печі за допомогою корекції завдання основному регулятору положення електродів, а також підхід до реалізації підсистеми формування завдання, з метою забезпечення найбільш вигідного (енергетично) поточного режиму роботи електродугової печі. Блок, що відповідає за корекцію завдання формує вихідний сигнал на основі значень струмів, напруг та активної потужності з метою підтримки максимально можливої активної потужності. Система керування, запропонована в [40] не може бути використана для керування електрокальцинатором через конструкційні розбіжності електрокальцинатору та електродугових печей: в більшості електрокальцинаторів зміна положення електродів можлива лише шляхом внесення конструктивних змін в апарат, тому й реалізація системи автоматизації з контуром керування положенням електродів не може бути реалізована. В той же час алгоритм функціонування блоку корекції завдання може бути використаний як основа у випадку розробки каскадної системи керування термічною обробкою вуглецевої сировини в електрокальцинаторі.

В роботі [41] описано розробку адаптивної системи керування промислового призначення для електричних печей опору.

Схема запропонованої адаптивної системи керування представлена на рис. 24.

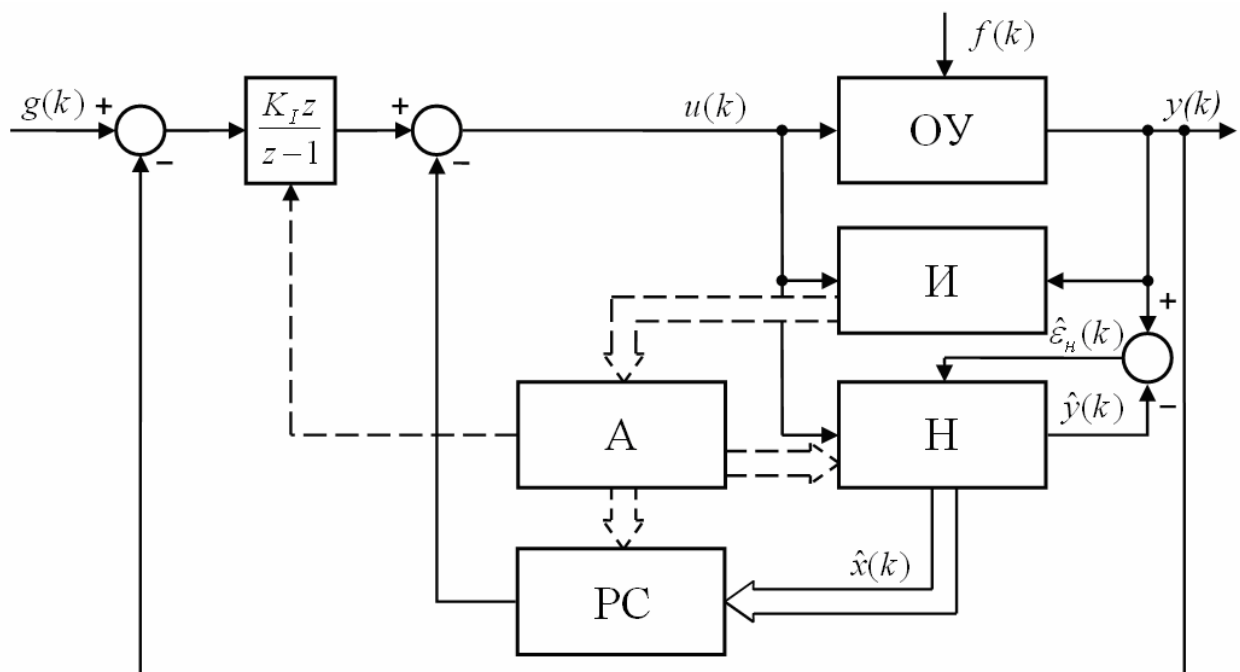


Рис. 24. Цифрова самоналагоджувальна система управління: ОУ - об'єкт управління, И - ідентифікатор, А - адаптатор, Н - спостерігач, РС - регулятор стану

В представленій системі керування сигнал від ОУ надходить до ідентифікатора, в якому за допомогою методу найменших квадратів або ж безпосередньо по перехідній характеристиці здійснюється ідентифікація об'єкту у вигляді передавальної функції в  $Z$  – області. Параметри отриманої функції передаються на адаптатор, в якому на основі отриманих даних формуються налаштування спостерігача та регулятора стану. Спостерігач стану формує вектор оцінок стану ОУ і передає його на регулятор стану, який формує поправку на керувальний сигнал.

Основним недоліком запропонованої системи керування в контексті використання для створення системи керування термічної обробкою вуглецевої сировини в електрокальцинаторі є використання передавальної функції в  $Z$  – області в якості моделі об'єкту в той час, як система керування електрокальцинатором має враховувати розподіл температур в робочому об'ємі апарату (тобто модель має мати більше однієї вихідної змінної), а саме керування може здійснюватися за допомогою зміни як електричного режиму так і режиму завантаження/вивантаження матеріалу (тобто модель має мати як

мінімум дві вхідні змінні). Також запропонована система керування складається з контуру регулювання за температурою в печі, тоді як в процесі високотемпературної (2000 – 2500 °С) обробки вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторі відсутня можливість безпосереднього вимірювання температури матеріалу в робочій зоні печі.

Дослідження [20,28, 42,43 ] присвячені покращенню якості продукції за рахунок введення модифікацій електрокальцинатору, таких як встановлення електрично нейтральних дроселів, різна установка електродів, додаткові газовідвідні труби, використання печей з кип'ячим шаром та ін. Дані дослідження не розглядають способи керування електрокальцинатором.

В даному проекті пропонуємо розглянути нову систему керування об'єктом, в якому система автоматичного керування з МПС регулятором має значно кращі показники якості управління, ніж попередні дослідження, і обсяги необхідних обчислень.

### **3.2 Функціональна схема автоматизації**

Схему автоматизації було розроблено для ефективної роботи апарату, підвищення якості очікуваного продукту, зменшити негативний вплив людських помилок на результативність процесу, а також для збільшення продуктивності всього технологічного процесу.

Для вимірювання струму був розроблений перший контур, що включає: первинний вимірювач струму, що протікає в апараті, та його показання (цифрова індикація) - амперметр (1-1); вторинний перетворювач сигналу показувальний, реєструвальний, а також з пристроєм сигналізації (1-2); сигнальну лампочку червоного кольору (HL1).

Для вимірювання температури на виході з апарату був розроблений другий контур, що включає: формування сигналу, що передається на пульт керування (2-1); електричний нормувальний перетворювач (2-2); програмований регулятор, показувальний і реєструвальний (2-3).

Третій контур призначений для струму, що підводиться до апарату.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	80
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		



Для вимірювання рівня антрациту був розроблений четвертий контур, що включає: формування сигналу, що передається на пульт керування (4-1); електричний регулятор, показувальний і реєструвальний, а також з пристроєм, що має функцію сигналізації (4-2); сигнальні лампочки зеленого (HL3) та червоного кольору (HL2).

Також для запуску або зупинки процесу в електрокальцинаторі були використані контури п'ять та шість, що включають: М1 та М2 – електромотори відцентрового насосу; швидкість та частота обертання цих моторів (3-1 та 5-1); магнітні пускачі (МП1 та МП2), кнопки пуск (SB2, SB4) та стоп (SB1, SB3), а також вимикачі (SA1, SA2), за допомогою яких відключаються від живлення магнітні пускачі МП1 та МП2; сигнальні лампочки зелених (HL5, HL7) та червоних кольорів (HL4, HL6).

### **3.3. Синтез систем керування**

В даному процесі температура обробки сировини відіграє важливу роль, оскільки саме від цього параметру залежить якість бажаного продукту, а також подальша його обробка. Тому була розроблена система керування, що вирішує два завдання, а саме, по-перше, температура матеріалу повинна бути на певному рівні, а по-друге, мінімізувати різницю температур в електрокальцинаторі. Система керування складається з 2-х контурів: 1-й контур (1 завдання): за рахунок зміни сили струму вивести температуру системи на заданий рівень; 2-й контур (2 завдання): за рахунок швидкості подачі сировини мінімізувати різницю температур матеріалу по всьому об'ємі апарату.

#### **3.3.1. Налаштування ПІД-регулятора**

У сучасному світі пропорційно-інтегро-диференційні (ПІД) регулятори широко поширені в технічних системах і використовуються порядку в 90-95% регулюючих контурів. Така популярність викликана тим, що регулятор дозволяє досягти поставленої мети управління для більшості технологічних об'єктів, при цьому його структура компактна і проста. За довгу історію свого використання і розвитку закон ПІД керування доповнився нововведеннями,

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	81
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

покликаними підвищити його ефективність, це – реалізація диференціювання, боротьба з насиченням інтегральної складової і випереджаюче керування. Однак ключовим питанням у використанні ПД-регулятора було питання налаштування його коефіцієнтів. Спочатку це питання вирішувалося за допомогою оператора, який, використовуючи свої знання і досвід, а так само інтуїцію, здійснював налаштування ПД-регулятора, спираючись на методи розрахунку коефіцієнтів регулятора, наприклад Ціглера-Нікольса. Згодом, з появою ЕОМ, а, отже, і програмованих логічних контролерів (ПЛК), SCADA систем і розподілених систем управління (РСУ), з'явилися методи автоматичного налаштування (автоналаштування) ПД-регуляторів, мета яких разова настройка, або настройка за запитом оператора, регулятора в автоматичному режимі з використанням випробувальних впливів [22].

ПД-регулятори широко поширені на сьогоднішній день не тільки в промисловості, але і в інших технічних галузях. Великий обсяг розв'язуваних задач зумовив виникненню різних форм ПД-регуляторів, а так само безліч методів їх синтезу. Уже 60 років активно ведуться дослідження в області ПД регулювання, було опубліковано величезну кількість статей і звітів, а також книг, в яких обґрунтовано необхідність різних методів синтезу і приведені прості правила розрахунку параметрів ПД регуляторів [22].

Структура ПД-регулятора:

$$C(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) = k_c + k_1 \frac{1}{s} + k_D s, \quad (21)$$

де  $s$  – символ перетворення за Лапласом,  $k_c$  – коефіцієнт підсилення регулятора,  $T_I$  – постійна часу інтегрування,  $T_D$  – постійна часу диференціювання [22].

Існуючі нині методи синтезу ПД-регуляторів можна розділити на наступні групи:

- 1) Інтуїтивна настройка. Спосіб налаштування передбачає зміну параметрів ПД-регулятора незалежно один від одного за «інтуїцією» до тих пір, поки мета керування не буде досягнута.

- 2) Характеристичні методи. Ці методи з'явилися на основі практичного досвіду (так само як і методи Циглера-Нікольса) і передбачають налаштування регуляторів за даними отриманими в результаті випробування в розімкненому контурі.
- 3) Аналітичні методи (Алгебраїчний синтез). Параметри ПД-регулятора обчислюються з аналітичних або алгебраїчних залежностей між моделлю об'єкта і метою. Як правило, аналітичні методи дають прості формули і можуть бути використані в адаптивних системах, однак потрібна мета управління в аналітичній формі і досить точна модель об'єкта керування.
- 4) Частотні методи. Частотні характеристики об'єкта керування використовуються для настройки ПД-регулятора. Як правило, ці методи ресурсомісткі і спрямовані на синтез робастних ПД-регуляторів.
- 5) Оптимальний синтез. Цей метод можна розглядати як особливий вид оптимального управління, де коефіцієнти ПД-регулятора знаходяться за допомогою чисельних методів оптимізації, комп'ютерної евристики або еволюційних алгоритмів. Як правило, оптимізація вимагає значну кількість ресурсів і здійснюється в тимчасовій області [22].

Автоналаштування ПД-регуляторів поширені сьогодні більше, ніж адаптація. Це викликано тим, що алгоритми адаптації часто складніші алгоритмів автоналаштування і вимагають більшої обчислювальної потужності. Крім того, алгоритми автоналаштування пройшли деякий період апробації, оскільки ідеї закладені в них засновані на простих методах налаштування ПД-регуляторів, подібні методам Циглера-Нікольса [22].

### **3.3.2. Налаштування ПД-регулятора за допомогою Циглера-Нікольса**

Методи налаштування за допомогою Циглера-Нікольса:

- 1) Налаштування за перехідною характеристикою об'єкта керування:

В даному методі параметри ПД-регулятора вибираються на основі аналізу перехідної характеристики об'єкта керування, отриманої в результаті ступінчастого впливу. Недоліком цього методу є те, що подається сходинка, яка

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	83
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

повинна бути достатньої величини для того, щоб на тлі перешкод і зовнішніх збурень можна було виділити складову перехідного процесу [22].

## 2) Налаштування за допомогою коливань:

Даний метод передбачає штучне створення коливань в контурі керування, що дозволяє ідентифікувати так звану критичну точку (точку перетину годографа АФЧХ замкнутої системи з негативною дійсною віссю  $(-1; 0j)$ ) шляхом вимірювання амплітуди і частоти коливань, і використання формул перерахунку для визначення коефіцієнтів ПД-регулятора [22].

Метод незатухаючих коливань передбачає розрахунок робочих параметрів ПД регулятора в два етапи. На першому етапі система керування повинна бути переведена в ручний режим роботи, а регулятор в режим П-регулювання. Підбирається таке налаштування пропорційного регулятора (тобто вимикається інтегральна і диференціальна складові: виставляємо всі коефіцієнти  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  в 0), при якому в замкнутій системі встановлюються незгасаючі коливання (рис. 28), тобто система знаходиться на границі стійкості. Це значення настройки  $k_{lkr}$  називається критичним. На другому етапі починаємо поступово збільшувати значення  $k_p$  і стежимо за реакцією системи. Потрібно, щоб в системі почалися стійкі коливання (викликані перерегулюванням). Збільшуємо  $k_p$ , доки коливання системи не стабілізуються (перестануть загасати). Запам'ятовуємо поточне значення  $k_p$  і заміряємо період коливань системи ( $T^*$ ). Розраховуємо робочі налаштування вибраного регулятора за наближеними формулами в залежності від величини  $k_{lkr}$  та періоду незгасаючих коливань  $T^*$ . Далі наводяться формули для розрахунку параметрів регулятора за методом Циглера-Нікольса [23].

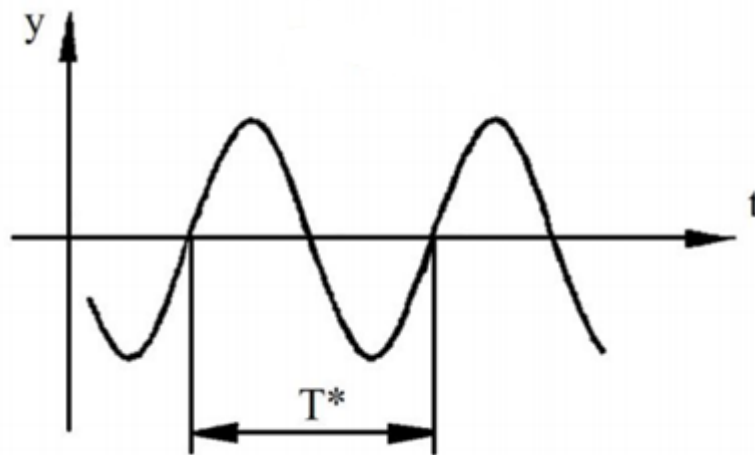


Рис. 28. Метод Циглера-Нікольса

Розрахунок ПІД-регулятора:

$$\begin{aligned} k_p &= 0.6 \cdot k_1^{kp}; \\ \frac{k_i}{k_p} &= \frac{T^*}{2}; \\ \frac{k_d}{k_i} &= \frac{T^*}{8} \end{aligned} \quad (22)$$

В даній роботі здійснено налаштування ПІД регуляторів за допомогою Циглера-Нікольса. На рис. 29 представлена структурна схема системи керування з ПІД регуляторами. Також для дослідження були обрані передавальні функції 2-го порядку з найкращою точністю з ідентифікації моделі. В даній системі керування є два контури: контур керування за швидкістю та за силою струму. Модель складається з 6 контрольних точок температур. Перший ПІД регулятор подається на другий вхід моделі керування, це є сила струму, що протікає в апараті. Тобто перший регулятор виконує перше завдання: вивести температуру системи на заданий рівень. Другий ПІД регулятор подається на перший вхід моделі керування, це є швидкість подачі матеріалу і виконує друге завдання: за рахунок швидкості подачі сировини мінімізувати різницю температур матеріалу по всьому об'ємі апарату.

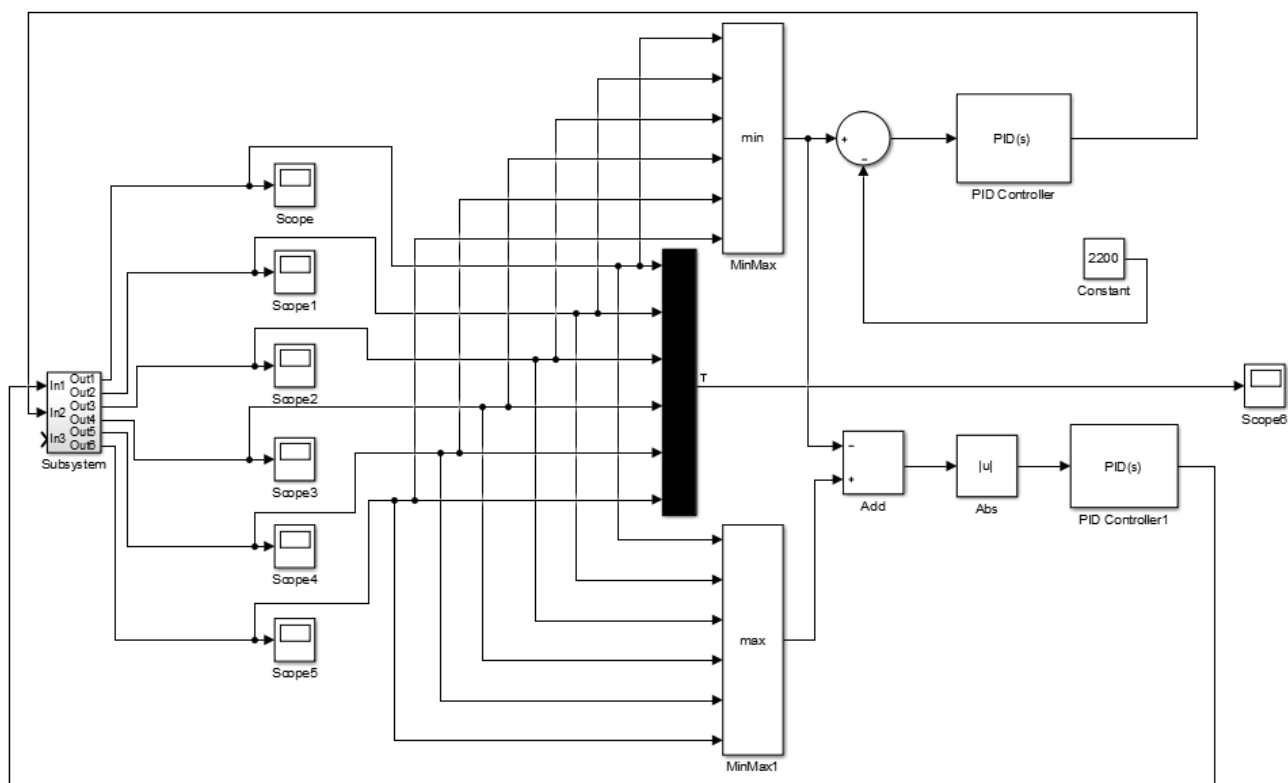


Рис. 29. Структурна схема системи керування з ПІД-регуляторами

Після дослідження отримали такі результати:

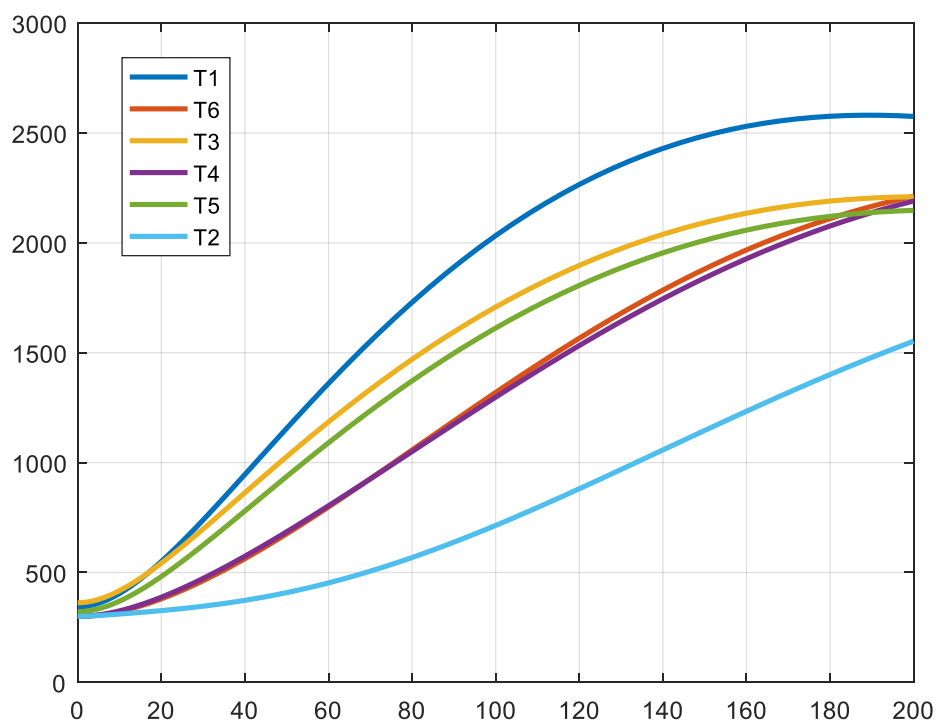


Рис. 30. Перехідні характеристики з ПІД-регуляторами

З даного графіку можна зробити висновок, що контрольні точки T6, T3, T4, T5 виходять на заданий бажаний рівень температури 2200 °C. Але деякі точки на цей рівень не виходять, це пояснюється їх розміщенням в апараті. Температура T1 знаходиться безпосередньо біля верхнього електрода, де найбільше виділяється джоулеве тепло, тому вона нагрівається швидше і більш за всіх. А температура T2 має найменшу температуру, оскільки в цій точці знаходиться зовсім недавно завантажений матеріал і за такий короткий період часу він в будь-якому випадку не встигне прогрітися до потрібних температур.

### 3.3.3. Налаштування MPC-регулятора

Для керування складними динамічними об'єктами застосовують MPC регулятор (Model Predictive Control). Для синтезу такого регулятора необхідно скласти математичну модель об'єкта управління на основі якої регулятор буде прогнозувати зміну контрольованої величини на певний проміжок часу вперед і обчислювати оптимальний керуючий вплив, для забезпечення найкращої траєкторії контрольованої змінної [24].

Модель з прогнозованими параметрами (MPC) відноситься до класу алгоритмів, що обчислюють послідовність керованих змінних регулятора, щоб оптимізувати майбутню поведінку об'єкта керування. Спочатку модель була створена для спеціалізованих потреб контролю електростанцій і нафтової переробки. Технологія MPC використовується в різноманітних областях виробництва, які включають хімікати, харчову промисловість, автомобільну промисловість, космос, металургію та целюлозно-паперове виробництво [25].

Система автоматичного управління з MPC (Model Predictive Control) регулятором аналогічна схемі з нечітким регулятором (рис. 25).

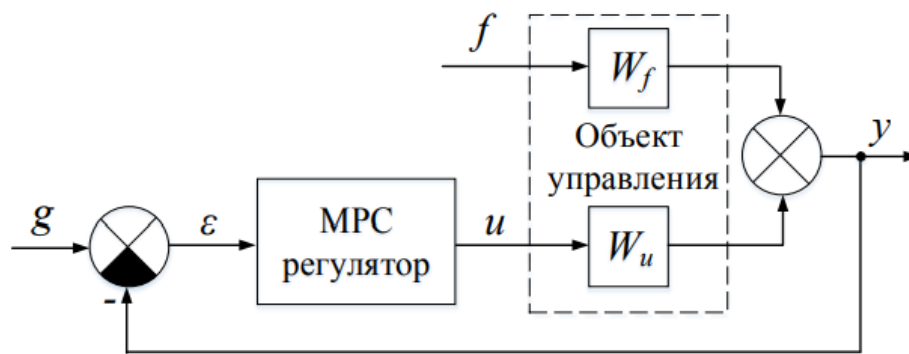


Рис. 25. Система автоматичного управління з MPC регулятором [24]

Структурна схема MPC регулятора представлена на рис. 26. До складу регулятора входить: прогнозуюча модель і блок оптимізації [24].

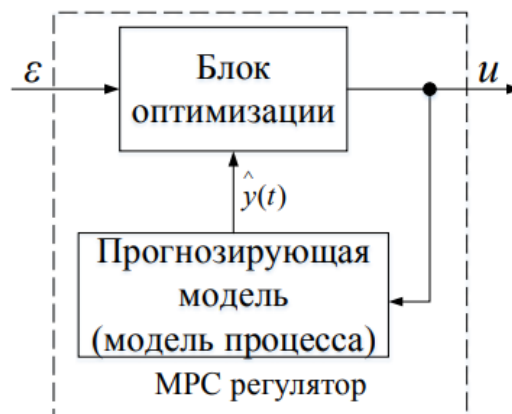


Рис. 26. Структурна схема MPC регулятора [24]

Основну ідею управління MPC можна представити в такий спосіб,  $\epsilon$  є вхід об'єкта керування  $u(t)$  і  $y(t)$  вихідна контрольована змінна,  $g(t)$  є бажаною величиною (залежністю) зміни контрольованої змінної. Розглянемо систему в дискретному часу, тобто тільки в моменти часу  $t = k \cdot \Delta T$ , при цьому  $\Delta T$  - деякий період квантування, а  $k$  - деяке ціле число. Для зручності графічного подання вважатимемо  $\Delta T = 1$  [24].

Основною особливістю управління за допомогою MPC регулятора є наявність математичної моделі об'єкта керування (процесу, апарату), яка досить точно описує його поведінку. Наявність адекватної математичної моделі об'єкта управління дозволяє прогнозувати значення контрольованої змінної на певне число кроків вперед (рис. 27) [24].



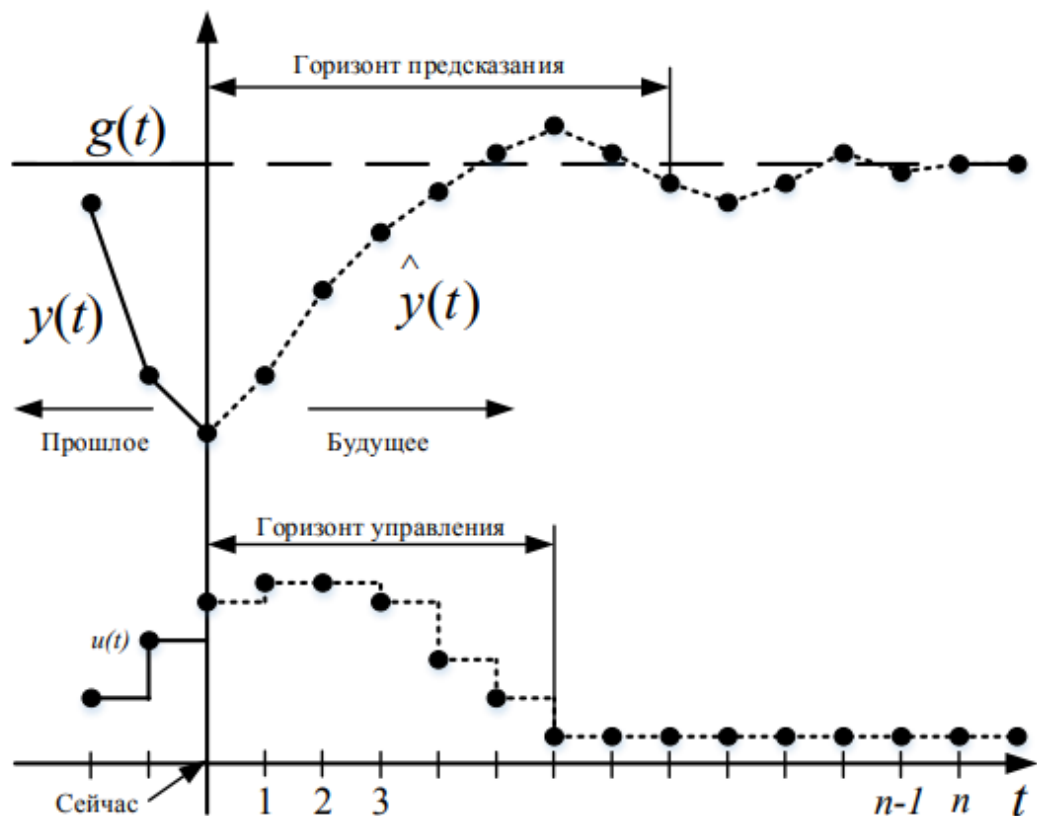


Рис. 27. Графічне представлення концепції управління з допомогою MPC регулятора [24]

Значення контрольованої змінної  $y(t)$ , яка передбачена в певний проміжок часу  $t$ , на рис. 27 позначена таким чином  $\hat{y}(t)$ . Горизонт передбачення будується на певне число тактів. Прогнозована траєкторія контрольованої змінної буде залежати від майбутніх значень керуючого впливу  $u(t)$ . Суть методу полягає в знаходженні деякої послідовності значень керованої змінної  $u(t)$ , яка дозволить забезпечити найкращу прогнозовану траєкторію для контрольованої змінної  $y(t)$ . Довжина послідовності розраховуються з управляючих впливів  $u(t)$ , що є фіксованою величиною і називається горизонтом управління. Шукана послідовність значень керуючого впливу визначається в результаті рішення деякої задачі оптимізації. Вибір найкращої траєкторії контрольованої змінної визначається показниками якості управління [24].

У роботі застосовується показник якості, який містить квадрат неузгодженості між прогнозованою вихідною змінною об'єкта управління  $y(t)$  і

бажаною траєкторією  $g(t)$ . При виборі оптимальних значень керованої змінної  $u(t)$ , регулятор прагне мінімізувати функціонал, представлений виразом вигляду:

$$J = Q \cdot \sum_{i=1}^p (y(k+1) - r(k+1))^2 + R \cdot \sum_{i=0}^{m-1} u^2(k+i), \quad (20)$$

де  $Q$  і  $R$  - вагові коефіцієнти,  $p$  - число тактів, на яких будується прогноз реакції контролюваного змінної  $y(t)$  (горизонт передбачення),  $m$  - довжина послідовності майбутніх значень керуючого впливу  $u(t)$  (горизонт управління) [24].

Після подачі на об'єкт управління першого елемента обчисленої оптимальної послідовності керуючого впливу  $u(t)$ , на наступному такті вся процедура повторюється заново, з урахуванням інформації, що знову надійшла. Таким чином функціонує MPC регулятор [24].

Технологія MPC неухильно прогресувала двадцять два роки після першого застосування IDCOM та DMC. Дані дослідження показують, що на сьогоднішній день налічується близько 2200 заявок, з використанням MPC технології в нафтохімії, а також в області застосування від хімічних речовин до харчової промисловості. Важливе спостереження складається в тому, що промислові диспетчери MPC майже завжди використовують емпіричні динамічні моделі. Можливість ідентифікації моделювання процесу пропонується з урахуванням теорії оптимального управління на прогнозованому контролі моделі [25].

Інше спостереження полягає в тому, що процес ідентифікації і системи керування контролюється окремо в поточній технології MPC. Зусилля направлені на інтегровану ідентифікацію та на розробку контролю. Наприклад, оцінка невдачі з процесу ідентифікації може бути використана більш безпосередньо в простій системі керування [25].

### *Напрямки розвитку МРС*

Кілька технічних досягнень ще не були включені в промислову технологію МРС. До них відноситься використання нескінченного горизонту прогнозування, щоб гарантувати номінальну стабільність замкнутого контуру і використання теорії лінійної оцінки для покращення зворотного зв'язку по виходу [25].

Технологія МРС наступного покоління, ймовірно, буде включати в себе кілька цільових функцій, нескінченний горизонт прогнозування, нелінійні моделі процесів, більш ефективне використання оцінок невизначеності моделей в промисловості і кращу обробку несприятливих умов. Параметри вихідної і вхідної траєкторії будуть включати задані значення, зони. МРС з використанням нелінійних моделей, ймовірно, стане більш поширеною, оскільки користувачі вимагають більш високу продуктивність, а нові програмні інструменти роблять нелінійні моделі більш легкими. Можливо набуде поширення використання FIR моделей. Альтернативний підхід буде ідентифікувати модель процесу на основі параметричних моделей, таких як моделі передатної функції або стану, а потім перетворювати модель в бажану форму для використання контролером.

В даній роботі було проведено дослідження МРС регулятора. Дана система має можливість управляти МІМО моделями (multiple inputs, multiple outputs – кілька входів, кілька виходів), тобто в даному дослідженні ми розглядаємо два входи і шість виходів. Система повинна в залежності від контрольних точок обчислювати силу струму і швидкість подачі матеріалу. Також система повинна враховувати невимірюване збурення у вигляді зміни опору матеріалу.

Структура даної системи з МРС регулятором представлена на рис. 28.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		91

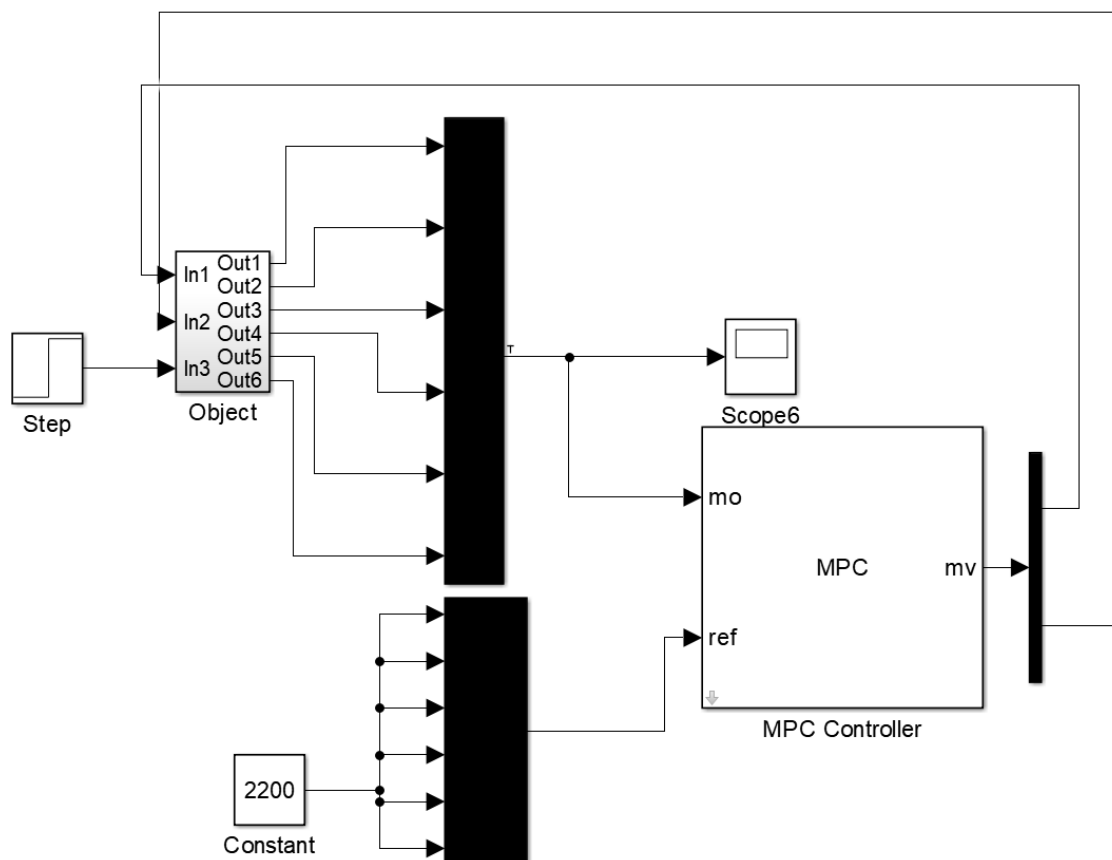


Рис. 28. Структурна схема системи керування процесом з MPC регулятором

За допомогою перебору в робочому вікні МПС регулятора були підібрані його настройки, результати налаштування і саме вікно на рис. 29.

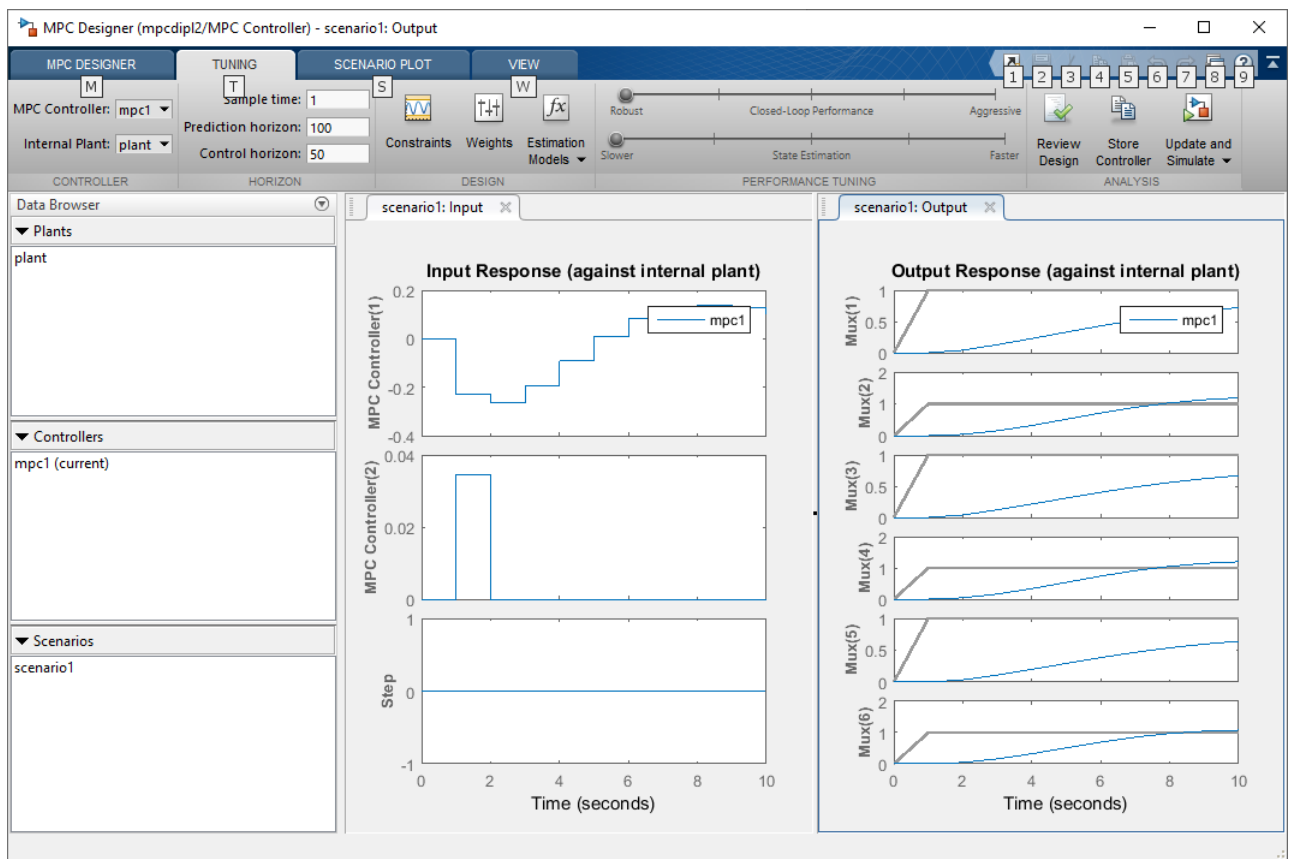


Рис. 29. Робоче вікно MPC регулятора з налаштованими Prediction horizon та Control horizon

Результат роботи системи з налаштованим MPC регулятором на 30 рисунку. Згідно даного дослідження можна зробити висновок, що судячи за графіками, MPC регулятор краще справляється ніж ПІД. По-перше, MPC регулятор дає точніші данні, а по-друге, він набагато швидше і якісніше справляється.

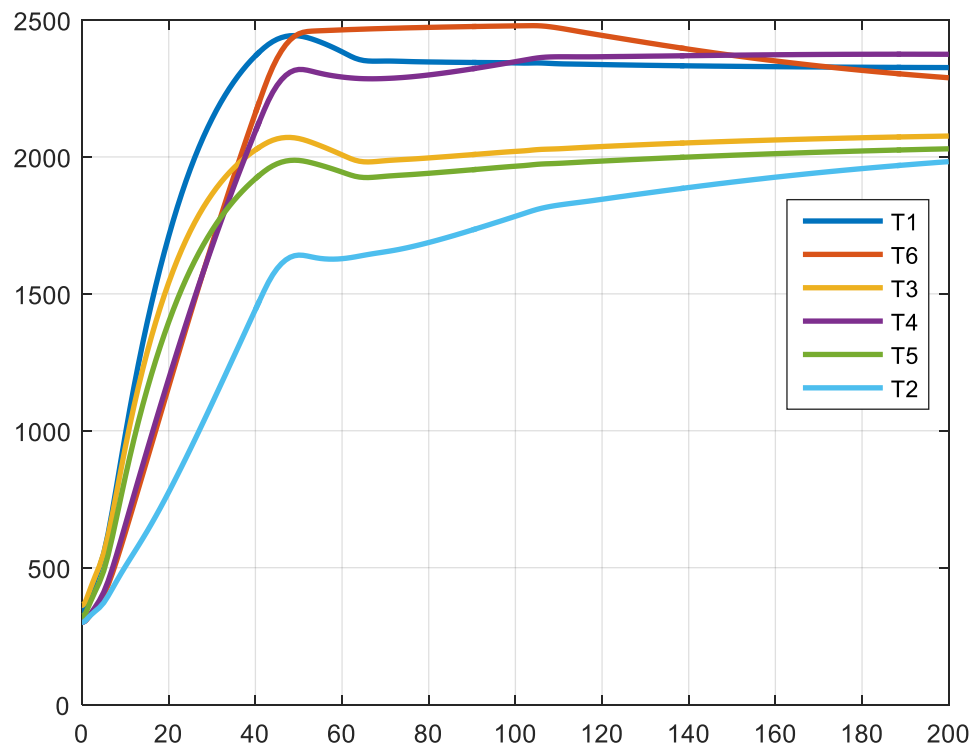


Рис. 30. Динаміка температури робочої зони електрокальцинатора з МРС регулятором

### 3.4 Дослідження системи керування

В даній роботі ми будемо робити порівняльний аналіз двох одержаних систем управління МРС та ПІД регулятора. Для цього ми досліджуємо крім динамічних характеристик систем керування з різними регуляторами, ще й реакцію систем на збурення. На рисунках 31 та 32 наведені перехідні характеристики з урахування збурення для ПІД та МРС регуляторів.

Для чисельного порівняння результатів роботи систем також використовуємо інтегральний квадратичний критерій.

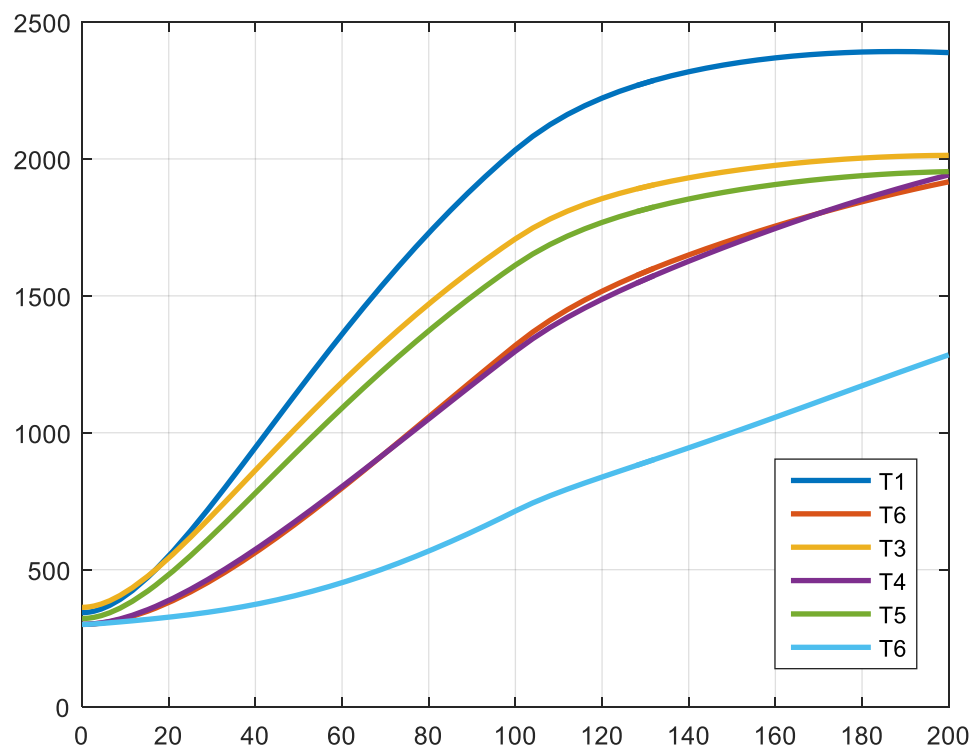


Рис. 31. Динаміка температури робочої зони електрокальцинатора з ПІД регулятором та врахуванням впливу збурення.

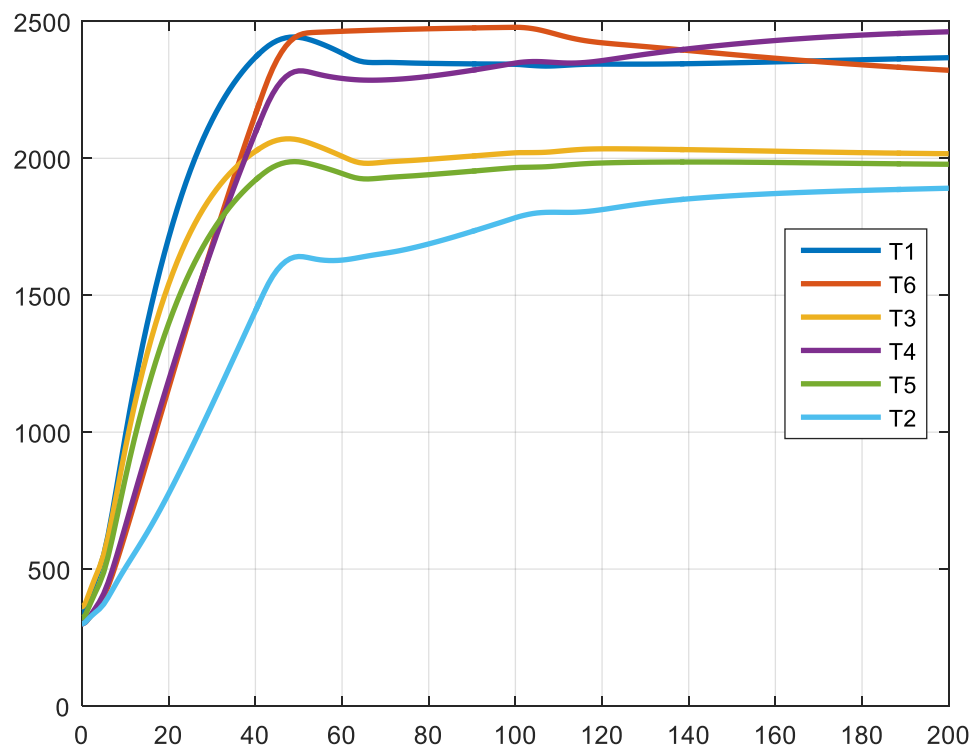


Рис. 32. Динаміка температури робочої зони електрокальцинатора з МРС регулятором та врахуванням впливу збурення.

Квадратичний інтегральний критерій, за яким порівнюються системи розраховується за формулою (21):

$$I = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^T (T_i^3 - T_i(k))^2, \quad (21)$$

де  $N$  – кількість контрольних точок,  $i$  – номер контрольної точки,  $T$  – кількість проміжків часу,  $k$  – проміжок часу,  $T_i^3$  – завдання для  $i$ -ї точки,  $T_i(k)$  – значення температури в  $i$ -й точці в  $k$ -й проміжок часу. Результати розрахунку даного критерію наведені в таблиці 2:

Табл. 2. Результати розрахунку квадратичного критерію

Система керування	Значення $I$ без збурень	Значення $I$ зі збуреннями
На основі ПІД регуляторів	247126	261258
З МРС регулятором	176659	180362

Очевидно, що в обох випадках набагато краще з задачею керування справляється система з МРС регулятором, отже для керування процесом прожарювання доцільно використовувати саме таку систему керування.



#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

1) Відповідно до закону України «Про охорону праці», підприємство зобов'язане забезпечити всім працюючим на ньому безпечні та нешкідливі умови праці і несе відповідальність за шкоду, заподіяну їх здоров'ю та працездатності. Забезпечення безпеки праці реалізується як при проектуванні технологічних процесів, так і при їх впровадженні.

Вірно виконані заходи з охорони праці та навколишнього середовища при незначних додаткових затратах на них, в порівнянні з витратами на будівництво всього об'єкту, надійно захищають його, людей, котрі на ньому працюють, а також підвищують експлуатаційні показники при зменшенні шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Для подальшого вдосконалення умов праці необхідно покращити якість контролю виконанням вимог діючих норм стандартів, правил, інструкцій та інших документів з техніки безпеки, що підлягають виконанню в процесі проектування.

2) Відповідно до теми дипломного проекту «**Автоматизація процесу прожарювання вуглецевих виробів**» в даному випадку розглядається процес формування вуглецевих виробів. Він є максимально автоматизованим. Це дозволяє знизити кількість працюючих робітників безпосередньо в цеху ( $S = 2700 \text{ м}^2$ ,  $V = 48600 \text{ м}^3$ ), що, в свою чергу, знижує робочий травматизм.

Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор, пульт якого знаходиться у виробничому приміщенні площею  $S = 40 \text{ м}^2$  та об'ємом  $V = 120 \text{ м}^3$ .

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі і обслуговуванні обладнання являються:

- ураження електричним струмом;
- виробниче освітлення;
- виробничий шум і вібрації;
- повітря робочої зони.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		97

Перед початком роботи необхідно перевірити:

- робоче місце, яке утримується в чистоті та порядку;
- справність обладнання та його механізмів;
- наявність та справність огорожень;
- справність електрообладнання, відсутність пошкоджених зовнішніх проводів;
- наявність та справність заземлення обладнання;
- справність витяжної вентиляції, підключеної до установки;
- справну роботу аварійної кнопки, “СТОП” та блокувальних пристроїв.

#### 4.1 Електробезпека

1. Приміщення операторської з точки зору небезпеки враження людини електричним струмом у відповідності з ПУЕ-76 відноситься до класу 1 (без підвищеної небезпеки). Умови, що визначають клас даного приміщення – це наявність струмопровідних підлог, перекриттів, наявність електродвигунів.

2. На пульті управління оператора напруга  $U = 220/380$  В, частота  $f = 50$  Гц. Напруги, що використовуються в мережі: для пристроїв автоматизації та сигналізації; струм – перемінний;

Режим нейтралі – глухо-заземлений.

Тип електромереж - трьохфазна чотирьохпровідникова мережа із глухо-заземленою нейтраллю.

3. Можливі причини ураження людей електричним струмом:

- коротке замикання;
- відсутність або старіння ізоляції;
- неузгодженні включення/відключення обладнання;
- порушення наряду-допуску до ремонту електромереж.

4. Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		98

- інструктаж і навчання безпечним методам праці;
  - встановлення блокування безпеки та огорожі;
  - встановлення плакатів і знаків безпеки;
  - недоступність елементів установки, що знаходяться під напругою (кабелі вкладаємо в полівінілхлоридові труби, піддати захисту: недоступність кабелів на висоті  $h_{\min} = 2,7-3$  м, застосування огорожувальних пристроїв);
  - ізоляція струмопровідних частин пульта керування ( $R \geq 0,5$  МОм).
- Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, яким покриваються струмопровідні елементи або відділяються від інших конструктивних частин;
- електророзділення мережі за допомогою спеціальних роздільних трансформаторів;
  - рубильники включення замкнені в спеціальних шафах, різні кольори пускового та робочого обладнання. Кольори показані в таблиці 3:

Таблиця 3. Кольори маркування та розміщення шин у електроустановках

Шина	Колір маркування шин	Розміщення шин		
		При розміщенні ошиновки		У відгалудженнях
		Вертикальному	Горизонтальному, під кутом, в трикутник	
Фаза А	Жовтий	Верхня	Найбільш віддалена	Ліва
Фаза В	Зелений	Середня	Середня	Середня
Фаза С	Червоний	Нижня	Ближня	Права
Нульова робоча	Блакитний	-	-	-
Нульова захисна	Продольні жовті та зелені полоси	-	-	-

— при роботі з електроінструментом ( $U \leq 42\text{В}$ ), застосовуються індивідуальні засоби захисту, такі як діелектричні рукавички і калоші, гумові килимки, ізольовані підставки.

До обслуговування електрообладнання допускаються особи, що склали кваліфікаційній комісії іспит з ПУЕ електроустановок будь-якого типу, а також пройшли відповідний інструктаж на робочому місці.

Під час роботи лінії забороняється виконувати ремонт, наладку та змащування частин, що рухаються, доторкатись до гарячих та рухомих частин, працювати при відкритих щитках та огороженнях.

В випадку якої-небудь небезпеки або поміченої несправності необхідно негайно зупинити установку натисканням аварійної кнопки “СТОП” та повідомити про це майстра.

В аварійному режимі використовується пристрій занулення і захисне автоматичне відключення, відповідно до ГОСТ 12.1.030-81/91.

Розрахунок занулення приводиться для визначення сили струму та напруги, значення яких повинні бути безпечними для життя людини.

Вихідні дані:  $U_{\phi}=220\text{В}$  – напруга фази,  $R_0=0.1\text{ Ом.}$  – опір заземлення нейтралі,  $Z_0=0.2\text{ Ом.}$  – опір заземлення корпусу.

Розрахунок:

Струм короткого замикання забезпечує спрацювання захисту:

$$I_3 = U_{\phi} / (R_0 + Z_0) = 220 / 0.3 = 733\text{ А};$$

Напруга на корпусі:

$$U_k = I_3 \cdot Z_0 = 733 \cdot 0.2 = 146\text{ В};$$

Так як напруга значна, то необхідно застосовувати нульовий захисний провідник.

Заземлення нейтралі знижує напругу до безпечного значення, у випадку замикання фази на землю:

$$U_k = I_3 \cdot R_0 = 220 \cdot / (0.1 + 100) = 2.2\text{ В}$$

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		100

Застосувавши опір повторного захисного провідника знижуємо у випадку обриву нульового провідника напругу на корпусі по місцю обриву:

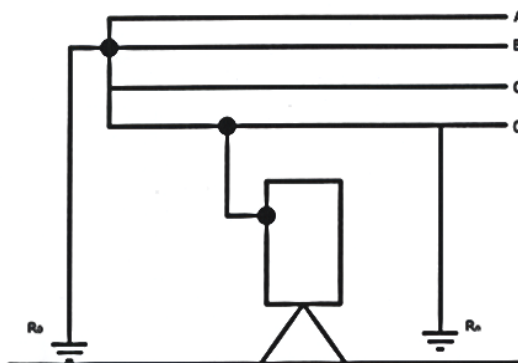


Рис. 33. Схема занулення електроустановки в трьохфазній мережі

## 4.2 Виробниче освітлення

Виробництво, що розглядається потребує зорової уваги. В операторній використовуються лампи денного світла. В приладах використовується підсвічування шкали. В цеху використовується змішаний тип освітлення (природне освітлення доповнюється штучним). Проектом передбачене робоче, евакуаційне, аварійне і ремонтне освітлення. Тип джерела світла для системи загального освітлення – лампа LED (виробник – AXIOMA energy), потужність  $W = 10$  Вт, потік  $\Phi = 1000$  лм, термін служби – 25000 годин, кількістю 40 шт, так як висота цеху більше 10 метрів і доцільно використовувати цей тип лампи. Передбачається штучне освітлення у всіх приміщеннях і на всіх площадках установки, нормована освітленість повинна становити: комбінованого освітлення –  $E_{\text{нор1}} = 200$  лк, загального освітлення –  $E_{\text{нор2}} = 150$  лк, фактична становить  $E_{\text{фак}} = 240$  лк, що відповідає вимогам ДБН В 2.5.28 – 2006.

## 4.3 Виробничий шум та вібрація

Джерелами шуму та вібрації в даному виробництві виступають електродвигуни. Шум класифікується як постійний. Рівень шуму –  $L=100$  дБ, що не відповідає вимогам.

Оператор, що здійснює спостереження за технологічним процесом, знаходиться в операторній, в цьому приміщенні необхідно забезпечити рівень шуму згідно регламенту. Для зменшення виробничого шуму передбачено проведення наступних заходів:

- операторська повинна бути виконана цегляною кладкою, оштукатуреною з обох сторін ( $\Delta L=15\text{дБ}$ ).
- встановлення екранів, за допомогою футеровки корпусів двигунів і насосів ( $\Delta L=15\text{дБ}$ ).
- своєчасне змащування всіх поверхонь, що труться ( $\Delta L=6\text{дБ}$ ).
- своєчасний ремонт всіх механічних вузлів за регламентом ( $\Delta L=8\text{дБ}$ ).

Фактичний рівень шуму –  $L = 60$  дБА, що відповідає вимогам згідно з ДСН 3.3.6.037-99.

Персонал необхідно забезпечити індивідуальними засобами захисту – протишумові навушники ПШН – Б та протишумові вкладиші «Беруши СТ – 1».

Технологічний об'єкт керування витримує рівень вібрації з частотою до 25Гц та з амплітудою не більш ніж 0.1мм.

Вібрації виникають внаслідок неточності установки обертаючих частин, нещільного з'єднання корпусів обертаючих частин до фундаменту.

Заходи проти вібрацій:

- обладнання лінії встановлено на фундаменти, маса яких набагато перевищує масу встановленого обладнання;
- використання гумових прокладок в якості амортизаторів;
- проектування додаткових ребер жорсткості.

Рівень технологічної вібрації у приміщенні не перевищує 90 дБ при частоті 4 Гц, що відповідає ДСН 3.3.6.039 – 99.

Для захисту рук від впливу загальної вібрації передбачене взуття на товстій гумовій підошві, відповідно до ГОСТ 12.4.002-74.

Для контролю рівня шуму і вібрації передбачений прилад ВШВ-003 і шумо-віброзамірний комплекс ШВК-1.

Сумарний час роботи в контакт з вібрацією не перевищує 2/3 робочої зміни. Тривалість неперервної дії вібрації не перевищує 15 – 20 хв. При такому режимі обідня перерва не менше 40 хвилин.

#### 4.4 Повітря робочої зони

Робота оператора по обслуговуванню апарата відноситься до категорії легких робіт (категорія 1б) по ГОСТ 12.1.005-88, тому що вона проводиться сидячи, не потребує систематичного фізичного навантаження або підняття ваги.

Енерговитрати людини досягають 150 ккал/год (категорія робіт – легкі фізичні роботи (категорія Іб)).

Згідно з ГОСТ фізичні параметри умов відповідають нормам:

— температура, фактична допустима – 21...23°C (для холодного періоду року), 22...24°C (для теплого періоду року);

— відносна вологість – 40...60% (для холодного й теплого періодів року);

— швидкість руху повітря – 0,1 м/с (для холодного періоду року), 0,2 м/с (для теплого періоду року);

— у холодний період року, нагрівання помешкання відбувається батареями з теплоносієм водою, нагрітою до температури 50...60°C;

— у теплий час року – вентиляцією.

Умови повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99.

Місце роботи оператора обладнано замкнутою системою вентиляції і кондиціонування, для яких використовуються осьові вентилятори Ц4-70.

Нижче наведені ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони за ГОСТ 12.1.005-88/98 (у мг/м<sup>3</sup>):

Таблиця 4. Значення ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Речовина	Значення ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки
Аміак	20	IV
Оксид вуглецю	20	IV

Тому застосовується експрес-метод, який дозволяє з достатньою точністю визначати концентрацію шкідливих речовин, безпосередньо, на робочому місці. Суть його полягає в протягуванні певного обсягу повітря через контрольні трубки з індикаторним порошком, який реагує зміною кольору на вміст шкідливих речовин у повітрі. До приладів експрес-методу відносяться газоаналізатори: УГ-2; ГХ-100; ГХ-4 та ін. Метод безперервного автоматичного контролю застосовується на робочих місцях з постійним впливом шкідливих речовин, які можуть викликати серйозні порушення в стані здоров'я людей або привести до аварій за рахунок виникнення вибухонебезпечності та пожежонебезпеки. Контроль проводиться автоматизованими системами із записом змін шкідливостей в повітрі у часі із застосуванням газоаналізаторів: Сирена-2 для аміаку і т.д. У зв'язку з цим, цех поділу повітря постачається устаткуванням приточно-витяжної вентиляції.

Технічні засоби, що забезпечують безпеку органів дихання: респіратор газопилозахисний «Клен - ГП», та респіратор ШБ – 1 «Лепесток – 200».

#### 4.5 Пожежна безпека

Оскільки в процесі формування вуглецевих виробів приймають участь легкозаймисті речовини (кам'яно-вугільний пек), та відбувається процес прожарювання, то дане виробництво відноситься до категорії Б (вибухопожежонебезпечне). Клас вибухонебезпечної зони 2 (відповідно до ПУЕ).

Виходячи з категорії пожежної безпеки виробництва (категорія Б) визначаємо потрібну ступінь вогнестійкості будівлі – клас 2 (згідно з СНиП2.01.02-85).



На основі вибраної степені вогнестійкості обираємо найменшу допустиму межу вогненебезпечності основних будівельних конструкцій.

Протипожежні перегородки виконуються з матеріалів, що не горять і мають спиратися на фундаменти, встановлюватися на всю висоту цеху. В залежності від категорії пожежної безпеки та степені вогнестійкості будівлі (А) визначаємо максимально допустиму відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого експлуатаційного виходу для об'єму приміщення 48600 м<sup>3</sup> - при густині людського потоку в спільному проході до 1 чол/м - найбільш допустима відстань 40 метрів. Кількість евакуаційних виходів - 2. Ширину тамбурів евакуаційних виходів слід приймати більшу, ніж ширина дверних проходів на 0.5(по 0.25м з кожного боку): ширина дверей найменша - 0.8м, найбільша - 2.4м.

Вибираємо тип та кількість первинних засобів пожежогасіння: На 400-500м вуглекислотних вогнегасників - 2 (типу ручних: ВВБ-7, ВВ-8), пінні, хімічні, повітряно-пінні та порошкові вогнегасники - 4шт; бочка з водою та відро, ящики з піском, совкові лопати, протипожежні покривала. Також повинні бути передбачені вогнегасник – САМ-9 з установкою в місцях розположення ємностей та апаратів з ЛЗР, також передбачені щити з протипожежним інвентарем. Вогнегасники та пожежний інвентар мають червоне пофарбування, а бочки з водою та ящики з піском ще й відповідні написи білою фарбою. Пожежний інструмент фарбується в чорний колір. Бочки для зберігання води з метою пожежогасіння встановлюються у виробничому приміщенні. Такі бочки повинні бути укомплектовані пожежним відром місткістю не менше 8л. Ящики з піском місткістю 0,5, 1,0 та 3,0 м<sup>3</sup> та повинні бути укомплектовані совковою лопатою. Протипожежні покривала, виготовлені з негорючого теплоізоляційного полотна, грубо бавовняної тканини повинні мати не менш як 2х1м та 2х2 м. Передбачена система виявлення пожежі та її гасіння. Система виявлення пожежі забезпечує відключення системи живлення та кондиціонування повітря.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		105

Системи звукової та візуальної сигналізації забезпечують негайне оповіщення основного персоналу. По попередженню вибухів передбачене герметичне устаткування, автоматичні локальні засоби пожежогасіння. Приміщення відділені від цеху незгораючими перегородками з межею вогнестійкості 0.75 годин.

Це приміщення захищене від атмосферної електрики по категорії-1 згідно з СН-305-77.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		106

## ВИСНОВКИ

Дипломний проект був розроблений для автоматизації процесу прожарювання вуглецевих виробів.

У дипломному проекті було проведено аналіз технологічного процесу та конструктивних властивостей електрокальцинатора.

Було створено високоточну ANSYS модель процесу прожарювання вуглецевих виробів, що враховує розподіл температур в усьому апараті.

У дипломному проекті була проведена ідентифікація моделі, що дозволяє спростити розрахунок складної моделі.

У дипломному проекті були розроблені та досліджені системи керування: ПД керування та МРС керування. Проведено їх дослідження та був обраний найоптимальніший регулятор.

Розглянуту високоточну модель та систему керувань можна використовувати для досліджень, а також моделювання процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу, тобто застосовувати на реальному виробництві.

Описані можливі ризики, що можуть виникати під час роботи на виробництві (процес прожарювання вуглецевих виробів), і становлять загрозу життю та здоров'ю робітників виробництва. Розроблено алгоритм запобігання даним чинникам, для зменшення травмування робітників та збереження їхнього здоров'я.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Санников А. К.** Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Металлургия, 1985 г. – 129 с. – Библиогр.: с. 128. – 1230 экз.
2. **Чалых А.Ф.** Графитация углеродистых материалов [Текст] / А.Ф. Чалых, В.П. Соседов – М.:Металургия, 1987 г. – 176 с. – Библиогр.: с. 176. – 1230 экз.
3. **Чалых А.Ф.** Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий [Текст] / А.Ф. Чалых – М.:Металургия, 1987 г. – 432 с. – Библиогр.: с. 176. – 1230 экз.
4. **Гринев А.Ф.** Металлургическая и горнорудная промышленность 2009 г.
5. **Карвацкий А.Я., Панов Е.Н., Кутузов С.В., Шилович И.Л., Васильченко Г.Н., Лелека С.В.** Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов, Киев НТУУ «КПИ» 2012.
6. **Лазарєв Т. В.** Закономірності процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах – електрокальцинаторах. – Автореферат.
7. **Жученко О.А.** Statement of the optimization problem of carbon products production / О. А. Жученко // Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація тех-нологічних і бізнес-процесів» Vol. 8, issue 2/2016. С. 39-44.
8. **Шулепов С. В.** Физика углеграфитовых материалов [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Металлургия, 1985 г. – 129 с. – Библиогр.: с. 128. – 1230 экз.
9. **Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В., Барсуков И.В., Гогоци А.Г., Бродниковский Н.П.** Печи для производства высокочистых углеродных материалов [Текст] / В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин – СПб., 2009. – 92 с. – ISBN 978–5–94777–211–1.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	108
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

10. **М.В. Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В. Гогоци А.Г.** Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов [Текст] / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. №2, 2013.

11. **Панов Е. Н., Матвиенко А. А., Карвацкий А. Я., Лелека С. В., Титов М. Е., Пулинец И. В., Лазарев Т. В., Степура П. В.** Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах [Текст] / *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»* ОАО «Укрграфит», г. Запорожье.

12. **Дикарева А.В., Герасименко Т.Е., Мешков Е.И.** Математическая модель тепловой работы электрокальцинатора [Текст] / *ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»*, г. Владикавказ 2012.

13. **Панов Е. Н., Карвацкий А. Я., Лелека С. В., Кутузов С. В., Степура П. В.** Моделювання процесу графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії [Текст] / *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*, Київ Відкрите акціонерне товариство «Український графіт», Запоріжжя.

14. **Kuipers J. A. M.** Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat-Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds /J. A. M. Kuipers, W. Prins, W. P. M / van Swaaij // *AIChE Journal*. — 1992. — Vol. 38, No. 7. — P. 1079— 1091.

15. **Syamlal M.** Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed / M. Syamlal, T. J. O'Brien // *AIChESymp. Series*. — 1989. — Vol. 85. — P. 22—31.

16. **Wen C.-Y.** Mechanics of Fluidization / C.-Y. Wen, Y. H. Yu // *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*. — 1966. — Vol. 62. — P. 100—111.

17. **Ogawa S.** On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials / S. Ogawa, A. Umemura, N. Oshima // *J.Appl. Math. Phys.* — 1980. — Vol. 31. — P. 483—493.

18. **Schaeffer D. G.** Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow / D. G.Schaeffer // J. Differential Equations.— 1987. — Vol. 66, No 1. — P. 19—50.

19. Електронна енциклопедія [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://vunivere.ru/work29399>.

20. **Цыбуля Е.И.** Повышение качественных характеристик термоантрацита для производства угольной продукции металлургического назначения / Журнал Весник 2014 г.

21. **Лакомский В.И., Быковец В.В.** О контактном нагреве термоантрацита в электрокальцинаторе // Цветные металлы. 2004. № 1.

22. **Александров А.Г., Паленов М.В.** Состояние и перспективы развития адаптивных пид-регуляторов в технических системах // Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

23. **Абрамов К.В.** Методика определения коэффициентов ПИД-контроллера при моделировании автоматизированных систем управления ректификационной колонной с применением пакета ChemCAD // МГУИЭ, г. Москва.

24. **Надеждин И. С., Горюнов А. Г., Маненти Ф.** Системы управления нестационарным объектом на основе мрс регулятора и пид регулятора с нечеткой логикой // Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск.

25. **Joe Qin S., Badwell Thomas A.** An overview of industrial model predictive control teghnology/ Department of Chemical Engineering The University of Texas at Austin, TX 78712, Rice University Houston, TX 77251.

26. **Бородуля В.А.** Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое / В. А. Бородуля – Минск.: Наука и техника, 1973 г. – 173 с.

27. **Петров Б. Ф.** Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита / Б.Ф. Петров – К.: Екотехнология, 2006 г. – 144 с.

					ДП ЛА52.02.00.000 ПЗ	110
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

28. **Губинский М. В.** Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов [Текст] / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, А.Г. Гогоци и др./ *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №2, 2013.

29. **Губинский М. В.** Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов [Текст] / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, А.Г. Гогоци и др./ *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №3, 2013.

30. **Гасик М.И.** Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине падения напряжения в антрацитовой загрузке электрокальцинатора [Текст] / М.И. Гасик, Е.И. Цыбуля, А.В. Безуглый, и др. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. - №5. – С. 39-40.

31. **Тимпанова Ж. Л., Немировский Ж. Л., Арлиевский М. П., Кисилев А. М., Сапов Ю. Н., Дерябин А. С., Лифсон М. И., Маргулис С. З., Ровинский В. А., Богданов Л. А.** Электродная масса для самообжигающихся электродов рудовосстановительных печей и способ ее получения [Текст]: пат. 2121989 Рос. Федерация : МПК7 C04B 35/52.

32. **Гасик М.И.** Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине падения напряжения в антрацитовой загрузке электрокальцинатора [Текст] / М.И. Гасик, Е.И. Цыбуля, А.В. Безуглый, и др. / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. - №5. – С. 31-35.

33. *Электронна енциклопедія [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:* <http://ru-patent.info/21/20-24/2121989.html>.

34. *Электронна енциклопедія [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:* <https://www.google.com/patents/WO2011149439A1?cl=ru>.

35. *Электронна енциклопедія [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:* [http://russianpatents.com/img\\_show/7081250.html](http://russianpatents.com/img_show/7081250.html).

36. **Тагиров М.А., Жирнов Б.С., Муртазин Ф.Р., Гостьков Е.В., Кугатов П.В., Баулин О.А.** Математическое моделирование вращающейся барабанной печи для активирования углеродного материала.

37. **Еременко Ю.И., Глущенко А. И., Фомин А. В.** О применении нейросетевого настройщика параметров пи-регулятора на тепловых объектах горно-металлургической отрасли в режиме отработки возмущений / Автореферат. НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия.

38. **Федин М.А.** Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем / Автореферат. НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия.

39. **Тагиров М.А., Жирнов Б.С., Муртазин Ф.Р., Гостьков Е.В., Кугатов П.В., Баулин О.А.** Математическое моделирование электрокальцинатора шахтного типа для активирования углеродного материала.

40. **Усачев М.С.** Многокритериальный выбор вариантов технических средств распределенных систем управления на основе четких, нечетких множеств и генетических алгоритмов / Автореферат. НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия.

41. **Смирнов Д.В.** Климатическое обеспечение использования низкопотенциальной тепловой энергии земли для применения в загородном строительстве/ Автореферат. НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия.

42. **Електронна енциклопедія [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:** <http://www.freepatent.ru/patents/2369815>.

43. **Панов Е. Н., Матвиенко А. А., Карвацкий А. Я. [та ін.]** Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження: зб. наук. Праць – 2011. - №1(7). Додаток – С. 49 – 55.



## **ДОДАТКИ**

# Специфікація устаткування, виробів та матеріалів

Додаток Д.1

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
1-1	Струм	Електрокальци натор	15 кА ... 20 кА	Електрокальци натор	Амперметр постійного струму <b>Н-392</b> ; DIN-бокси з розмірами: 48, 72, 96 і 144. Клас точності 1.5. Вимірювання 15 кА ... 20 кА, або .... 250 В. Обмінні шкали для BC48, BC72, BC96, BM 45. Система охоронної сигналізації може бути повністю налаштована для СВС 96. Цифрова індикація. $I_{вих} = 0...5\text{мА} \text{ ( } 4...20 \text{ мА)}$ , $U_{вих} = 0...10 \text{ В}$ ;	BC-A SERIESCIRC UTOR	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябинськ	1 од.
1-2	Струм	Електрокальци натор	— " —	Пульт керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з пристроєм сигналізації; $I_{вх} = 0...50 \text{ мВ}, 0...5 \text{ В}, 0...10 \text{ В}, 0...5 \text{ мА}, 4...20 \text{ мА}$ ; НСХ перетворювачів: термоелектричних – <i>B, K, L, S</i> , опору: 100П, 50М, 100М, клас точності 0.5	ДИСК-250ДД	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябинськ	1 од.
2-1	Температура	Трубопровід	2200 °С	Трубопровід 29	Термоелектричний перетворювач, НСХ А-1, діапазон вимірювання 0...2200 (2500) °С, $I_{вих} = 0...5 \text{ мА}$ , 4...20 мА, діаметр захисної арматури 10 мм на 500 мм,	ТВР-3488	НВО «Електротермія», Приладобудівний 3-д, м. Луцьк	1 од.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.02.00.000

Арк

114

## Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
					умовний тиск – атмосферний або вакуум; інерційність 30 с; клас допуску 2			
2-2	Температура	Трубопровід	___ " ___	Місцевий	Перетворювач нормувальний, $I_{вх} = 0...5 \text{ мА}$ , $4...20 \text{ мА}$ , а також від ТП НСХ В, К, L, S, R та ТО НСХ 50П, 100П, 50М, 100М; клас точності 0,4 (0,5) – залежно від діапазону вимірювання ТП, ТО; $I_{вих} = 0...5 \text{ мА}$ ( $4...20 \text{ мА}$ ), $U_{вих} = 0...10 \text{ В}$ ; цифровий інтерфейс RS-485	П282	НВО «Електротермія», м.Луцьк	1 од.
2-3	Температура	Трубопровід	___ " ___	Пульт керування	Програмований регулятор; $I_{вх} = 0-5 \text{ мА}$ , $0-20 \text{ мА}$ , $4-20 \text{ мА}$ , $0-10 \text{ В}$ , $0-50 \text{ мВ}$ , $0-200 \text{ мВ}$ , $0-1 \text{ В}$ , ТСП 50П, 100П, Pt500, Pt1000, гр.21, ТСМ 50М, 100М, гр.23 ТХК(L), ТХА(К), ТПП(S), ТПР(В), ТВР (А), ТЖК(J), ТХКн(Е); виходи: 4 аналогових і 1 дискретних; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; допустима зведена похибка 0,2 %; цифрова індикація	МИК-127	Підприємство «МІКРОЛ», м. Івано- Франківськ	1 од.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.02.00.000

Арк

115

## Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4-1	Рівень	Електрокальци натор	0,6...30 м	Електрокальци натор	Радарний рівнемір, частота електромагнітного сигналу – 94 ГГц, ширина вимірювального променя 4 град.; максимальний діапазон вимірювання рівня 0,6...30 м, абсолютна похибка $\pm 1$ мм, температура контролюваного продукту – не обмежена, робоча температура навколишнього середовища в місці встановлення датчика (- 60)...50 °C; $I_{\text{вих}} = 4...20$ мА; цифровий інтерфейс RS-485, Modbus; виконання вибухозахищене	УЛМ-11	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябинськ	1 од.
4-2	Рівень	Електрокальци натор	___ " ___	Пульт керування	Програмований регулятор; вхідні сигнали: 0-5мА, 0-20мА, 4-20мА, 0-10В, 0-50мВ, 0-200мВ, 0-1В, ТСП 50П, 100П, Pt500, Pt1000, гр.21, ТСМ 50М, 100М, гр.23, ТХК(L), ТХА(К), ТПП(S), ТПР(В), ТВР (А), ТЖК(І), ТХКн(Е); виходи: 4 аналогових і 1 дискретних; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; допустима зведена похибка 0,2 %; цифрова індикація	МИК-127	Підприємство «МІКРОЛ», м. Івано- Франківськ	1 од.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.02.00.000

Арк

116

## Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-1, 5-1	Швидкість	—	—	—	Тахометр, призначений для безконтактного вимірювання швидкості обертання в діапазоні: від 2,5 до 99999 rpm, дистанція вимірювання: 50 мм...400 мм, Вибір діапазону вимірювань: автоматичний. Точність вимірювання: 0,05%	AS926	Smart Sensor	2 од.
<b>Електроапарати</b>								
HL3, HL5, HL7	—	—	—	Пульт керування	Лампа сигнальна світлодіодна із зеленим індикатором («ПУСК»), $U_{\text{жив}} = 220 \text{ В}$ , 50/60 Гц, $d = 27 \text{ мм}$ , сила світла 20 мКд	СКЛ-11-3-2-220	БАТ «Кашинский завод», м. Москва	3 од.
HL1, HL2, HL4, HL6	—	—	—	Пульт керування	Лампа сигнальна світлодіодна із червоним індикатором («СТОП»), $U_{\text{жив}} = 220 \text{ В}$ , 50/60 Гц, $d = 27 \text{ мм}$ , сила світла 20 мКд	СКЛ-11-К-2-220	БАТ «Кашинский завод» м. Москва	4 од.
SB1,SB2, SB3,SB4	—	—	—	Пульт керування	Пост управління кнопковий, кількість елементів управління – 2; номінальна напруга ізоляції (за змінного струму частотою 50/60 Гц) 660 В, номінальний тепловий струм 10 А; температура довкілля від (-40) °С до 40 °С, відносна вологість повітря 98 %, комутаційна зносостійкість 1 000 000 циклів	ПКУ 15-21-131 УЗ	ЗАТ «Променергоавтоматика», м. Київ	4 од.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.02.00.000

Арк

117

Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
МП1, МП2	—	—	—	Місцевий	Пускач магнітний безконтактний нереверсивний з тепловим реле РТТ-326 136-160А, кнопками «ПУСК» і «СТОП» для керування трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкнутим ротором; номінальний робочий струм 160 А; додаткові контакти: 2 н. р. і 2 н. з.; номінальна робоча напруга 220, 380, 660 В, номінальна потужність 45 кВт; можуть застосовуватись у схемах з мікропроцесорною технікою	ПМ12- 160210 У2 В	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратур ы», м. Москва	2 од.
SA1, SA2	—	—	—	Місцевий	Кнопка запобіжного вимикання; номінальна робоча напруга: змінна (частота 50/60 Гц) 660 В, постійна – 440 В, номінальний тепловий струм – 10 А	КМЕ- 5111 УЗ	ТОВ «Кам'янець- Подільський електроме- ханічний завод»	2 од.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.02.00.000

Арк

118